



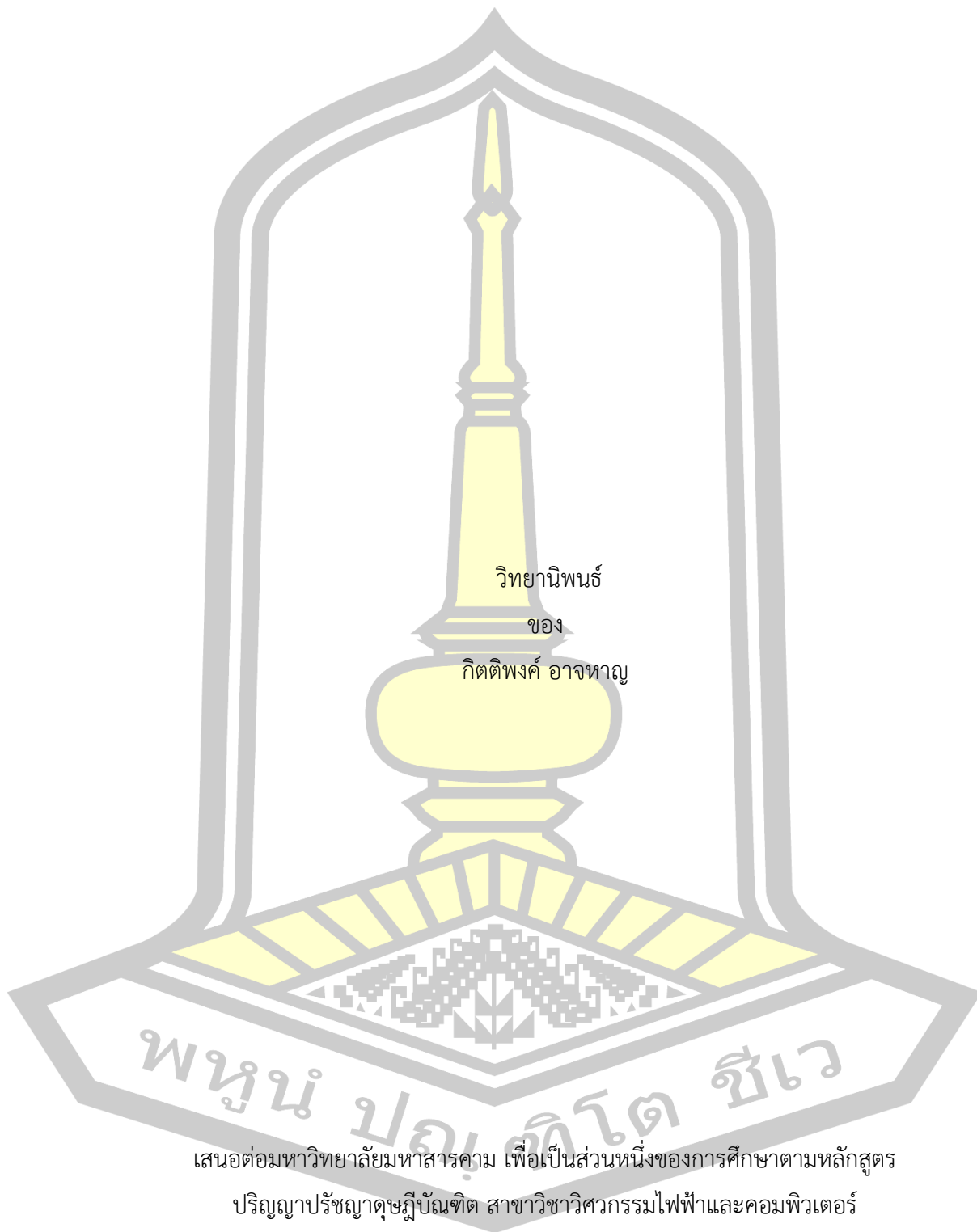
ตัวรับรู้ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้าง โดยไร้ฐานรอง

วิทยานิพนธ์
ของ
กิตติพงศ์ อัจฉาญ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ตัวรับรู้ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล 2 ข้าง โดยไร้ฐานรอง

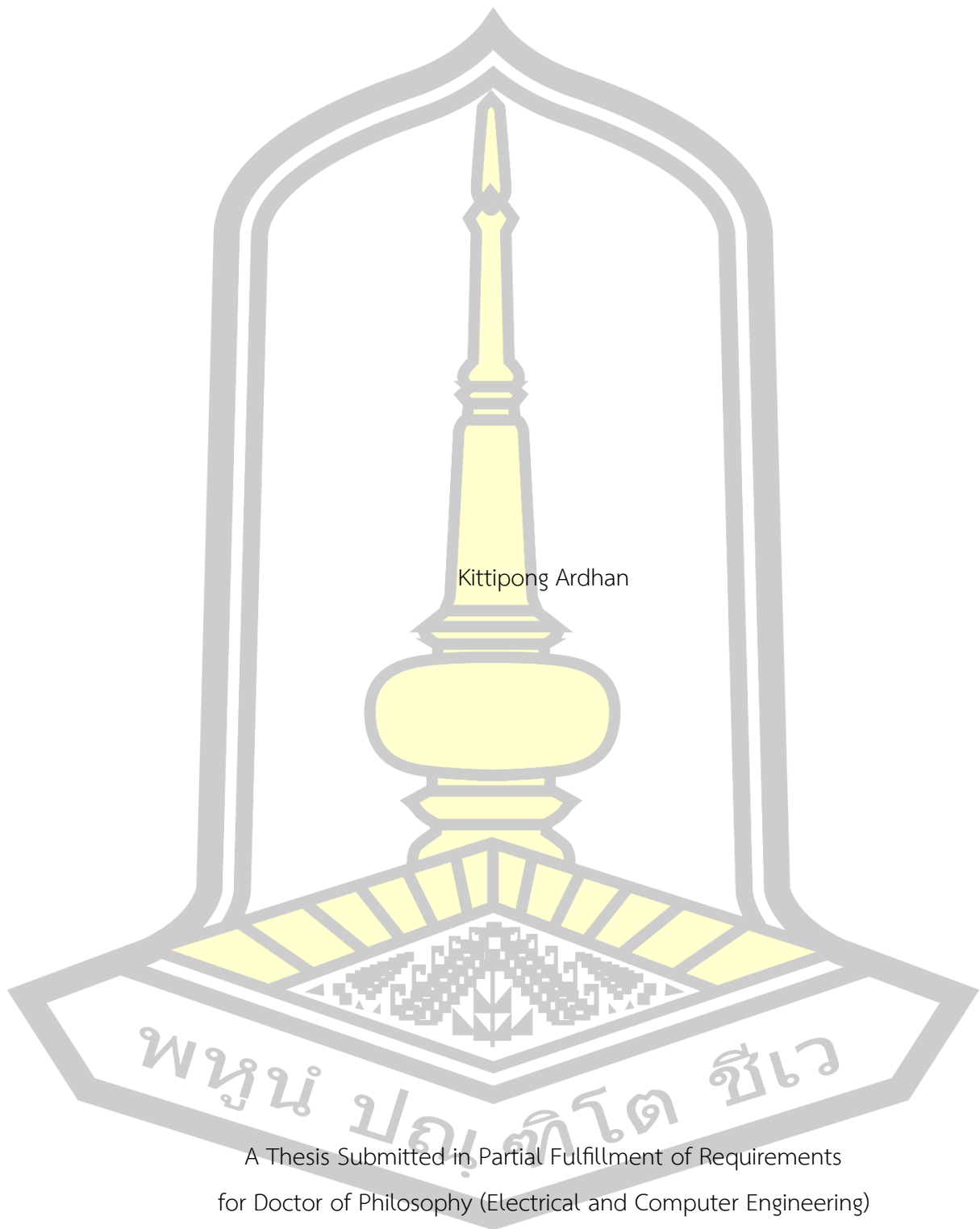


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

The 2 Sides Interdigital Capacitor Water Level Sensor with Non-Substrate



Kittipong Ardhan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

July 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกิตติพงศ์ อาจหาญ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสียมวิบูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉัตร สุวรรณทา)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง ตัวรับรู่ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทล 2 ข้าง โดยไร้ฐานรอง
 ผู้วิจัย กิตติพงศ์ อัจฉาย
 อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล
 ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2566

บทคัดย่อ

การวัดระดับน้ำ ใช้ได้ในงานเฝ้าระวัง หรืองานที่ต้องการแจ้งเตือน เช่น การแจ้งเตือนระดับน้ำในแม่น้ำ เพื่อแจ้งเตือนน้ำท่วม และสามารถนำไปประยุกต์แจ้งเตือนน้ำหมดถึงพักน้ำ หรือใช้ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำ การวิจัยครั้งนี้มีความมุ่งหมายเพื่อ ศึกษาเปรียบเทียบ คุณสมบัติทางไฟฟ้า วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความต้านทาน และค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม ที่ส่งผลต่อตัวรับรู่อินเตอร์ดิจิทลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง โดยออกแบบและสร้างตัวรับรู่ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทล 2 ข้าง แบบมีวัสดุฐานรอง(2sICS) และตัวรับรู่ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทล 2 ข้าง ไม่มีวัสดุฐานรอง (2sICS-ns) ชนิดละ 3 ขนาด ทดลองด้วยการวัดระดับของเหลว 20 ระดับเพื่อหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวรับรู่ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทล 2 ข้าง โดยใช้เครื่องวัด RLC Meter เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลง ผลการวิจัยพบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ 2 ข้างทั้ง 6 แบบ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าการเก็บประจุที่มากที่สุดที่วัดได้ คือ ตัวรับรู่ 2 ข้างแบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 3 ($a=1\text{mm}$, $b=1\text{mm}$, $L=15\text{mm}$) ที่วัดค่าได้ 0.32 - 1.97 ไมโครฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9995 โดยใช้ความถี่ในการวัดที่ 1 kHz

คำสำคัญ : ตัวรับรู่ระดับน้ำ, อินเตอร์ดิจิทลคาปาซิเตอร์, อินเตอร์ดิจิทล 2 ข้าง

พูน ปรณ กิตโต ชีเว

TITLE	The 2 Sides Interdigital Capacitor Water Level Sensor with Non-Substrate		
AUTHOR	Kittipong Ardhan		
ADVISORS	Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

Water level measurement is essential for surveillance and alert systems, river water levels to warn against flooding. applied to notify low water levels in storage tanks or control water flow. The objective of this research is to study and compare the electrical properties and analyze the relationships between electrical capacitance, resistance, frequency, and the water content in order to assess the perception of the digital capacitance sensor. The research involved designing and constructing Two-sided interdigital capacitor sensors(2sICS) and Two-sided interdigital capacitor sensors non-substrate(2sICS-ns).Three different sizes for each type were tested, resulting in a total of six models. The sensors were used to measure the fluid level at 20 different levels, aiming to determine the electrical charge storage values of the 2sICS using an RLC Meter for comparison.The research results revealed that as the water quantity increased, the charge storage capacity of both types of sensors increased. The highest charge storage capacity was achieved with the third configuration of the 2sICS-ns model a1b1L15(a=1mm, b=1mm, L=15mm), which measured capacitance values ranging from 0.32 to 1.97 microfarads with a high coefficient of determination (R^2) of 0.9995 at a measuring frequency of 1 kHz

Keyword : Water level sensor, interdigital capacitor, capacitor sensors non-substrate

กิตติกรรมประกาศ

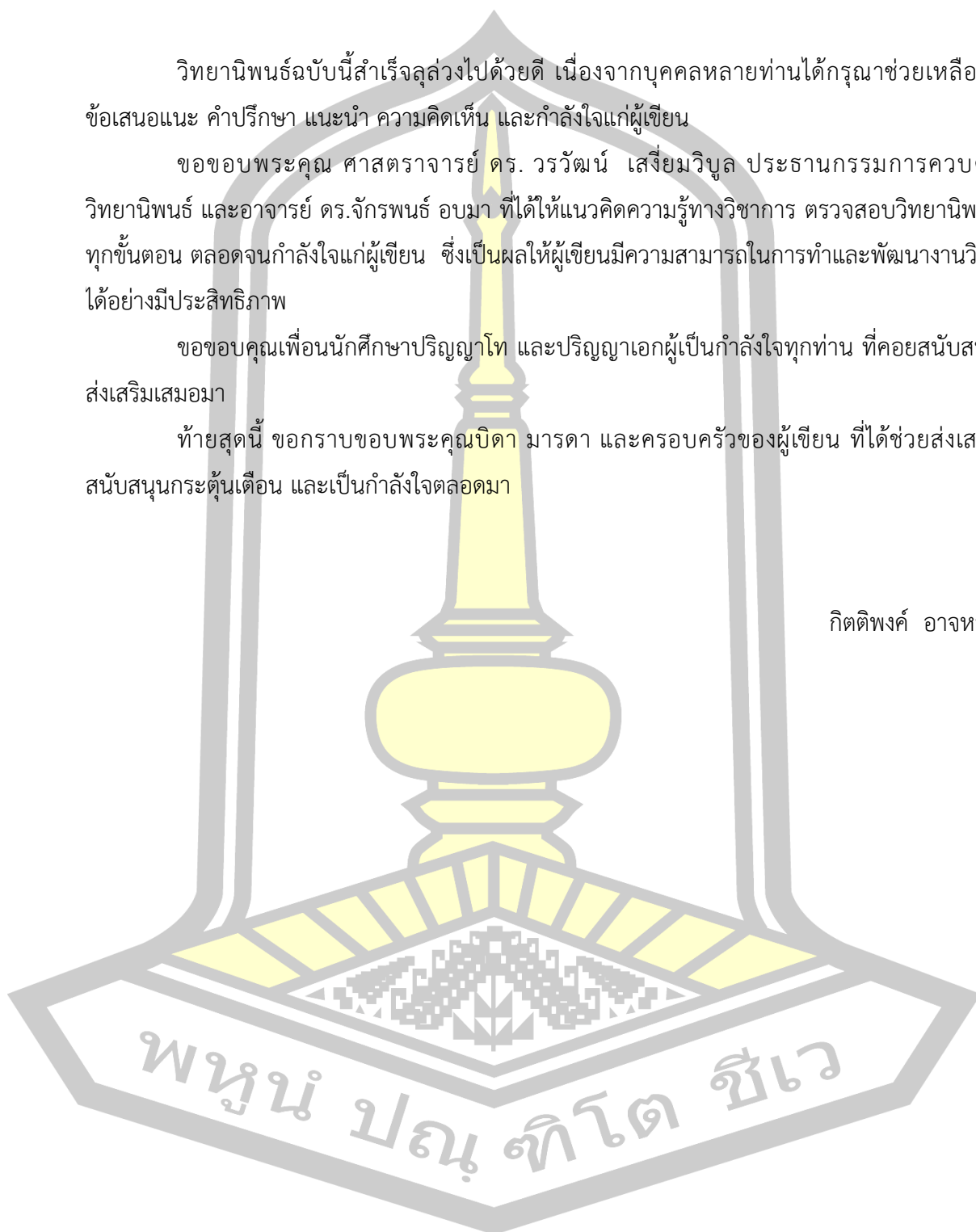
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้
ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ประธานกรรมการควบคุม
วิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.จักรพันธ์ อบรมา ที่ได้ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์
ทุกขั้นตอน ตลอดจนกำลังใจแก่ผู้เขียน ซึ่งเป็นผลให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำและพัฒนางานวิจัย
ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท และปริญญาเอกผู้เป็นกำลังใจทุกท่าน ที่คอยสนับสนุน
ส่งเสริมเสมอมา

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้เขียน ที่ได้ช่วยส่งเสริม
สนับสนุนกระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมา

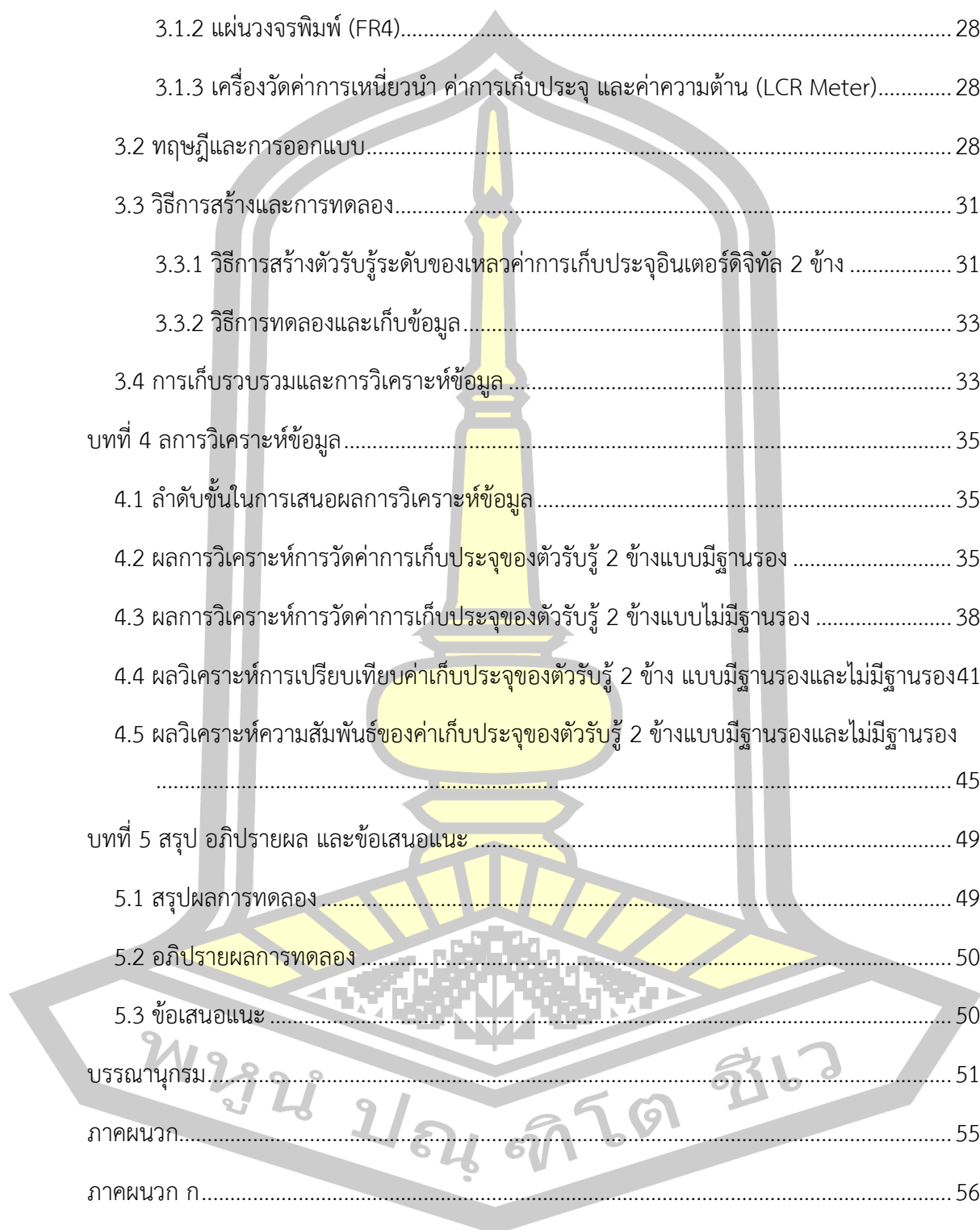
กิตติพงษ์ อัจหาญ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	4
2.1 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า.....	4
2.2 อุปกรณ์ตรวจจับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (Interdigital Capacitor Sensor).....	9
2.3 ตัวรับรู้ระดับของเหลว.....	12
2.3.1 การใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลว.....	12
2.3.2 การวัดระดับของเหลว.....	12
2.4 การปรีทัศน์วรรณงานวิจัย.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	27

3.1.1 แผ่นทองแดง	27
3.1.2 แผ่นวงจรพิมพ์ (FR4).....	28
3.1.3 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter).....	28
3.2 ทฤษฎีและการออกแบบ.....	28
3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง.....	31
3.3.1 วิธีการสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง	31
3.3.2 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล.....	33
3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล	33
บทที่ 4 ลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
4.1 ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล	35
4.2 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ 2 ข้างแบบมีฐานรอง	35
4.3 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ 2 ข้างแบบไม่มีฐานรอง	38
4.4 ผลวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู่ 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง41	
4.5 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุของตัวรับรู่ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง	
.....	45
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
5.2 อภิปรายผลการทดลอง.....	50
5.3 ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก.....	56
รูปแบบตัวรับรู่ระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง	56
รูปแบบตัวรับรู่ระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง	57



ตัวรับรูดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐานและไม่มีฐานที่ใช้ศึกษา 58

ภาคผนวก ข 59

ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐานและไม่มีฐาน 59

ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐาน a1b1L5 60

ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐาน a1b1L10 62

ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐาน a1b1L15 64

ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบไม่มีฐาน a1b1L5 66

ประวัติผู้เขียน 73



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ [3]	7
ตารางที่ 2 ตัวอย่างขนาดตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบมีวัสดุฐานรอง และไม่มีฐานรอง	31
ตารางที่ 3 ผลการค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรองก่อนการทดลอง ที่ระดับน้ำต่ำสุดและ สูงสุด	35
ตารางที่ 4 ผลการค่าการเก็บประจุแบบไม่มีฐานรองก่อนการทดลอง ที่ระดับน้ำต่ำสุดและสูงสุด	38
ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบนำค่าเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L5	41
ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบนำค่าเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองแบบ a1b1L10	43
ตารางที่ 7 ตารางเปรียบเทียบนำค่าเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองแบบ a1b1L15	44

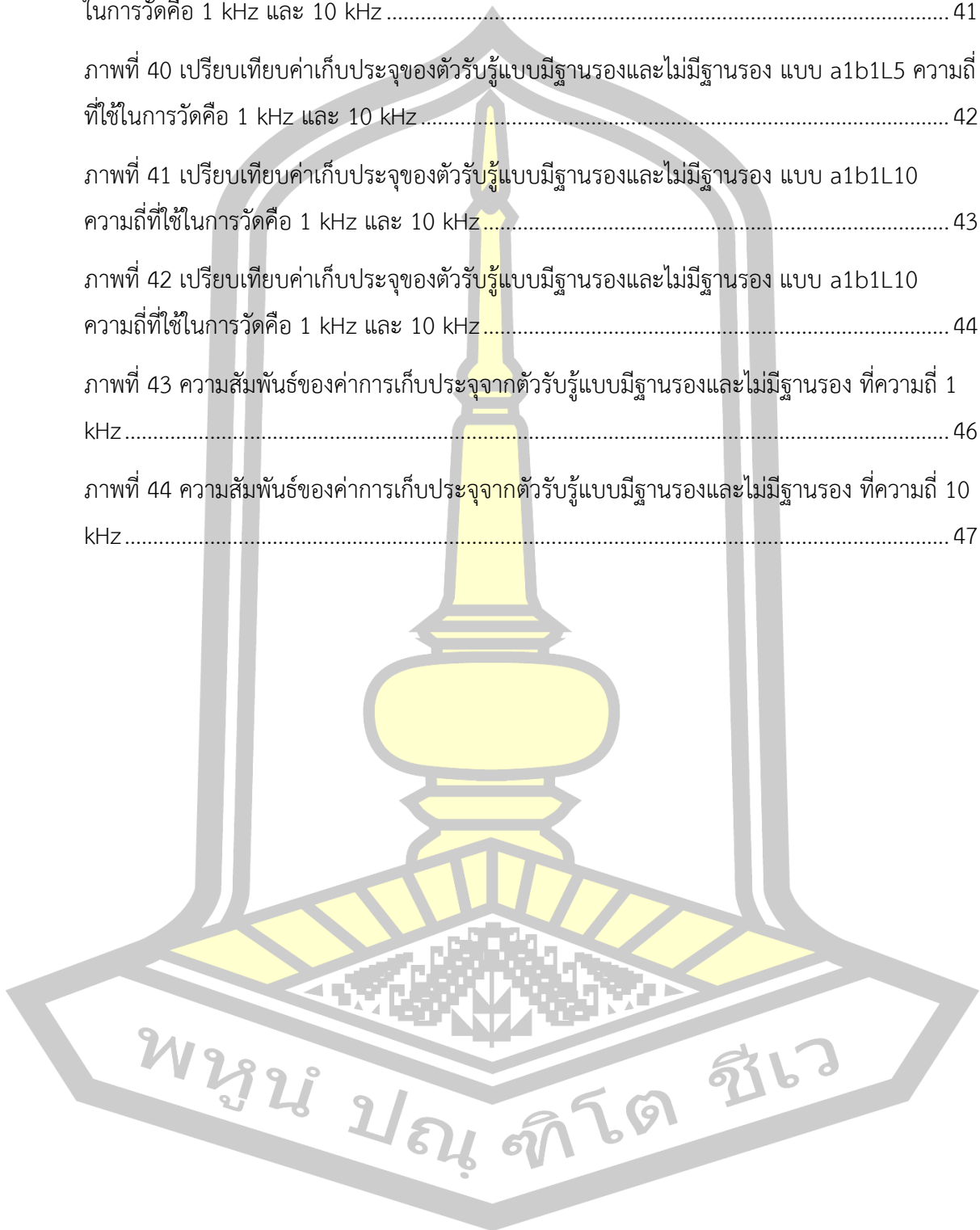
พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การกระจายตัวของประจุที่เกิดขึ้นผิวรอบตัวนำ.....	4
ภาพที่ 2 (ก) ไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง (ข) ไดอิเล็กทริกแบบไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง	6
ภาพที่ 3 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม	8
ภาพที่ 4 ตัวเก็บประจุต่อขนาน	8
ภาพที่ 5 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยเพื่อ เปิด-ปิด ระบบควบคุม [8].....	13
ภาพที่ 6 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอย เคลื่อนที่ตามระดับของเหลว [9]	13
ภาพที่ 7 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยประกอบเข้ากับคาน [9].....	14
ภาพที่ 8 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยประกอบเข้ากับชุดของโพเทนซีโอมิเตอร์ [9]	14
ภาพที่ 9 การวัดระดับน้ำโดยใช้หลักการของแสง [10].....	15
ภาพที่ 10 การวัดระดับของเหลวในถังโดยใช้วิธีการวัดความดันที่ก้นถัง [11].....	16
ภาพที่ 11 การวัดระดับโดยอาศัยแรงดัน [9]	17
ภาพที่ 12 การจัดวาง FBG สำหรับวัดระดับน้ำ [12].....	17
ภาพที่ 13 การวางแท่งสแตนเลสและเส้นลวดฉนวน PTEE ในถังน้ำ [13].....	18
ภาพที่ 14 การวางขดลวดเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำเพื่อวัดค่าประจุไฟฟ้า [14].....	19
ภาพที่ 15 การประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดระดับของเหลว [14].....	20
ภาพที่ 16 งานวิจัยเทคนิคโดยใช้การวัดค่าการเก็บประจุสามแบบสำหรับของเหลว [15].....	20
ภาพที่ 17 ระบบการวัดระดับน้ำอ้างอิงกับตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุต่อพื้นดิน [13].....	21
ภาพที่ 18 การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก [16].....	21
ภาพที่ 19 ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนานระยะใกล้สำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า [17].....	22
ภาพที่ 20 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ [17].....	22

ภาพที่ 21 การวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุ แบบอินเทอร์ดิจิตอล [7]	23
.....	
ภาพที่ 22 การวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล [6]	23
ภาพที่ 23 การวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม [19]	24
ภาพที่ 24 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตอลแบบใหม่ [20]	24
ภาพที่ 25 การพิมพ์และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ [21]	25
ภาพที่ 26 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตอลแบบไม่มีฐานรอง [22]	25
ภาพที่ 27 สร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล 2 ทาง แบบไร้วัสดุฐานรอง	27
ภาพที่ 28 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)	28
ภาพที่ 29 ภาพด้านบนของโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุ	29
ภาพที่ 30 ภาพตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล ก)แบบมีฐาน ข) แบบไม่มีฐาน	29
ภาพที่ 31 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล(FR4) 2 ข้างแบบมีฐานรอง	32
ภาพที่ 32 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล 2 ข้าง แบบไร้ฐานรอง	33
ภาพที่ 33 แผนภาพการวัดค่าการเก็บประจุกับเครื่องวัด LCR Meter	33
ภาพที่ 34 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	36
ภาพที่ 35 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	37
ภาพที่ 36 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	38
ภาพที่ 37 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	39
ภาพที่ 38 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	40

ภาพที่ 39 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวฐานรอง รั้วแบบไม่มี แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	41
ภาพที่ 40 เปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L5 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	42
ภาพที่ 41 เปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L10 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	43
ภาพที่ 42 เปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L10 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz	44
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง ที่ความถี่ 1 kHz	46
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง ที่ความถี่ 10 kHz	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

การวัดระดับน้ำ ใช้ได้ในงานเฝ้าระวัง หรืองานที่ต้องการแจ้งเตือน เช่น แจ้งเตือนระดับน้ำสูงในเขื่อน การแจ้งเตือนระดับน้ำในแม่น้ำ เพื่อแจ้งเตือนน้ำท่วม เป็นต้น ในระดับผู้ใช้ตามบ้านสามารถนำไปประยุกต์แจ้งเตือนน้ำท่วมถึงพักน้ำ หรือใช้ควบคุมปั้มน้ำเพื่อให้ปั้มน้ำทำงานอัตโนมัติเมื่อน้ำหมดถึง เป็นต้น เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำไม่มีเทคนิคที่ใช้ในการวัดโดยตรง แต่สามารถใช้เทคนิคอื่นๆ ในการวัดได้ โดยนิยมใช้งานมี 4 รูปแบบ คือ 1) ใช้วัดความสูงของระดับน้ำในถังโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก 2) วัดความกดดัน (Pressure) ของน้ำ 3) วัดน้ำถึงระดับด้วยเทคนิค Proximity 4) วัดน้ำถึงระดับด้วยลูกลอย ในการวัดระดับของเหลว มีความพยายามในการพัฒนาการวัดระดับน้ำโดยตรงด้วยการเปลี่ยนระดับของเหลวเป็นสัญญาณไฟฟ้า อาศัยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะซึ่งให้ค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามระดับของเหลวที่สัมผัส ค่าความจุไฟฟ้าจะถูกประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มาตรฐานสำหรับส่งต่อให้คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้มาตรฐานเดียวกันเพื่อเก็บข้อมูลระดับของเหลว โดยการวัดระดับของเหลวสามารถนำไปใช้ได้ ทั้งด้านสิ่งแวดล้อม การเกษตร อุตสาหกรรม เช่น การวัดระดับของเหลวในถังเก็บต่างๆ การวัดระดับน้ำในแม่น้ำ การวัดระดับน้ำในพื้นที่ผิวน้ำ การวัดปริมาณของนม เบียร์ อุตสาหกรรมประเภทอาหารและเครื่องดื่มการวัดปริมาณน้ำมัน เป็นต้น

เซนเซอร์วัดระดับของเหลวที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดโดยส่วนใหญ่ จะเป็นเซนเซอร์สำหรับใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำในการวัดสูง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เพื่อรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สามารถวัดของเหลวได้หลายชนิด ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีความปลอดภัยต่ออาหาร หรือสามารถแยกแยะระหว่างระดับของเหลวกับฟองบนผิวได้ ด้วยคุณสมบัติที่มีมาก ทำให้เซนเซอร์วัดระดับของเหลวในอุตสาหกรรมมีราคาสูง ไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้วัดระดับน้ำทั่วไป ไป เช่น การวัดระดับน้ำในแปลงเกษตร การวัดระดับน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือการวัดระดับน้ำในคลองชลประทาน ซึ่งเรายังขาดเซนเซอร์วัดระดับน้ำที่มีความเหมาะสมกับงานลักษณะดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงพัฒนาเซนเซอร์วัดระดับของเหลวด้วยการวัดระดับด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามระดับของเหลว วัดระดับของเหลว สามารถวัดระดับของเหลวได้อย่างแม่นยำ ใช้หลักการไม่ซับซ้อน ราคาถูก สามารถประยุกต์ได้หลากหลายอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระดับน้ำโดยใช้ตัวรับรู้อินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง แบบมีฐานรอง และไม่มีฐานรอง
- 2) วิเคราะห์เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองโดยใช้ตัวรับรู้อินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง
- 3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของซี่ ค่าการเก็บประจุ ค่าความถี่ ระดับน้ำ การมีฐานรองและไม่มีฐานรอง ของตัวรับรู้อินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ทางแบบไม่มีฐานรองได้
- 2) วัดค่าการประจุของตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้างแบบไม่มีฐานรองได้มากกว่าแบบมีฐานรอง
- 3) เพิ่มคุณลักษณะค่าการเก็บประจุได้มากขึ้นมีผลต่อการวัดที่มีความละเอียดมากขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้งานการวัดระดับของเหลวได้

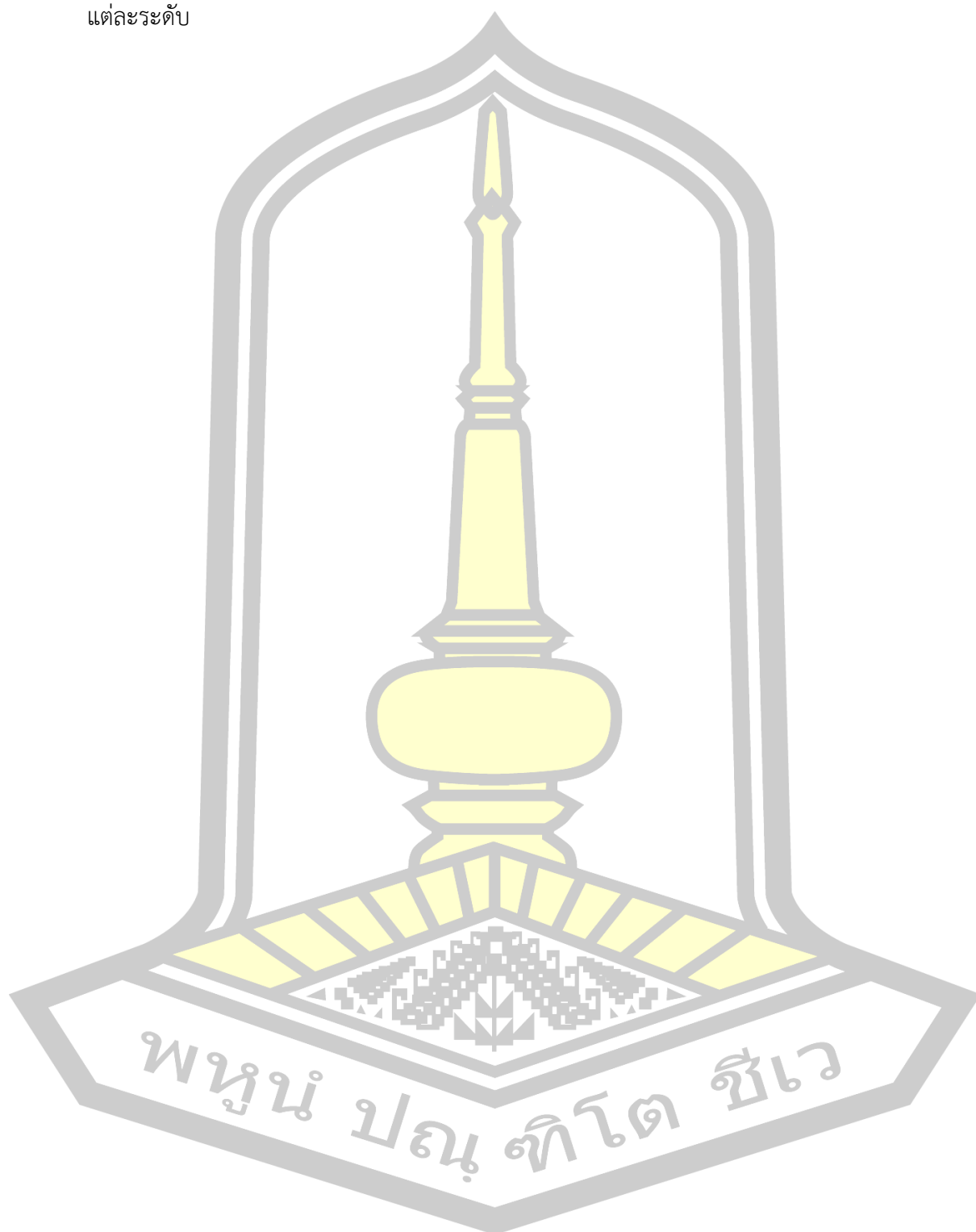
1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง แบบมีวัสดุฐานรอง และไม่มีวัสดุฐานรอง ชนิดละ 3 ขนาด เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ
- 2) วัดระดับของเหลว 20 ระดับเพื่อหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวรับรู้ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง โดยใช้เครื่องวัด RLC Meter
- 3) นำค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ระดับน้ำแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง ที่วัดได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ สมการเชิงเส้น

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1) ได้ความแตกต่างทางไฟฟ้าของระดับน้ำแต่ละระดับโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง โดยไม่มีฐานรอง
- 2) ได้พารามิเตอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระดับน้ำแต่ละระดับโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิิจิทัล 2 ข้าง โดยไม่มีฐานรอง

3) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความต้านทานและค่าความถี่ กับระดับน้ำ
แต่ละระดับ



บทที่ 2

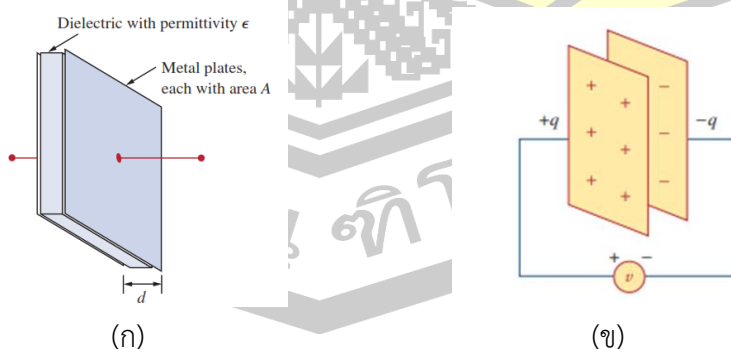
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบหรือใช้เป็นเครื่องมือวัดหาปริมาณ ความจุ หรือผลปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆได้ โดยการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้วางกรอบงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระดับน้ำแต่ละระดับด้วยตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัล 2 ขั้ว โดยใ้ฐานรอง ผู้วิจัยได้ศึกษาแต่ละหัวข้อตามขั้นตอนดังนี้

- 2.1 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า
- 2.2 อุปกรณ์ตรวจจับอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์
- 2.3 ตัวรับรู้ระดับของเหลว
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า

ค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า(Capacitance) คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า หรือจำนวนประจุไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุสามารถเก็บได้เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่มาป้อนเข้าหรือข้างต้นของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุนั้นประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (หรือเพลต) 2 ขั้ว แต่ละขั้วจะเก็บประจุชนิดตรงกันข้ามกัน ทั้งสองขั้วมีสภาพความจุ และมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกเป็นตัวแยกคั่นกลาง ประจุนั้นถูกเก็บไว้ที่ผิวหน้าของเพลต โดยมีไดอิเล็กตริกกันเอาไว้ เนื่องจากแต่ละเพลตจะเก็บประจุชนิดตรงกันข้าม แต่มีปริมาณเท่ากัน ดังนั้นประจุสุทธิในตัวเก็บประจุ จึงมีค่าเท่ากับ ศูนย์เสมอ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของประจุที่เกิดขึ้นผิวรอบตัวนำ
ที่มา Fundamentals of Electric Circuits 5th edition [1]

จากภาพที่ 1 เมื่อขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q) แปรผันตรงกับ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V) ดังนั้นความจุทางไฟฟ้า C มีค่าเท่ากับ

$$q = Cv \quad (2.1)$$

เมื่อ q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q)

v คือ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V)

C คือ ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์สองขั้ว

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเป็นดังนี้

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.2)$$

โดยที่ i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

v คือ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็น ฟารัด (farad, F)

ความจุไฟฟ้า (capacitance; C) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ปริมาณของประจุไฟฟ้าแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า (v) และแปรผันตามพื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำที่ขนานกัน (A) โดยแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่ขนานกัน (d) ในกรณีที่เป็นช่องว่างอากาศ (ϵ_0) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} Farads/meter และในกรณีที่เป็นไดอิเล็กทริก (ϵ) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังสมการ

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{หรือ} \quad C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าไดอิเล็กทริกของอากาศ ($\epsilon_{\text{air}} = \epsilon_0$) เท่ากับ 8.854×10^{-12} farad/meter

ϵ คือ ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำ (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (m)

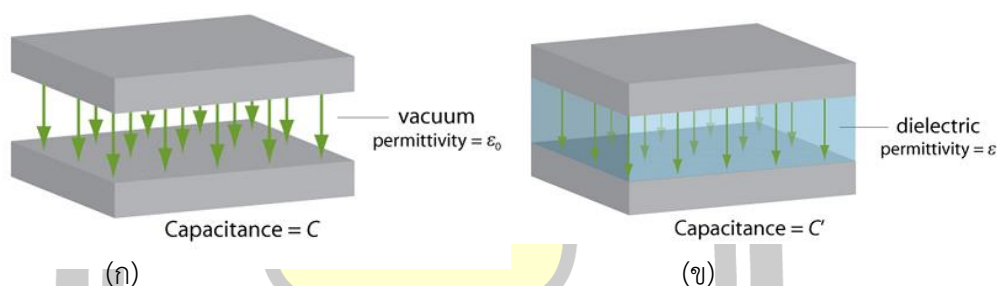
ไดอิเล็กทริก คือ เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร กระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ วัสดุไดอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric

material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือ เป็นฉนวนไฟฟ้า

สารที่ไม่นำไฟฟ้าตามปกติระหว่างแผ่นทั้งสองของตัวเก็บประจุ อาจเป็นอากาศหรือที่ว่างมีค่าสภาวะยอมเป็น ϵ_0 ถ้าสารไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งแทนที่ว่างดังกล่าวตัวเก็บประจุนั้นมีค่าความจุเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของค่าความจุใหม่ (ϵ) เทียบกับค่าความจุเดิม (ϵ_0) เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (dielectric constant “K”) แสดงดังสมการ

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

การทดสอบค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุใด ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสลับวัสดุใดมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ไม่มีหน่วย) การทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 (ก) ไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง (ข) ไดอิเล็กทริกแบบไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง

ที่มา http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php [2]

ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของน้ำ คือ น้ำในสถานะของเหลว โมเลกุลของน้ำ เป็นโมเลกุลที่มีขั้วโดยอะตอมของออกซิเจนมีขั้วเป็นลบเล็กน้อย และอะตอมของไฮโดรเจนมีขั้วเป็นบวกเล็กน้อย ทำให้น้ำมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเท่ากับ 78.5 และน้ำในสถานะของแข็ง เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งจะมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยึดจับกับน้ำที่อยู่รอบด้วยพันธะไฮโดรเจน ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความมีขั้วกับค่า dielectric constant ของตัวทำละลายดังตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ [3]

Material Dielectric	Dielectric Constant , $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
Vacuum	1
Air (1 atm)	1.00054
Air (100 atm)	1.0548
Glycerol	42.5
Methanol	32.6
Bakelite (Typical)	4.9
Mylar (Typical)	3.5
Ethanol	24.3
Acetone	20.7
Paper (Typical)	3.5
Porcelain (Typical)	7
Teflon (Typical)	2.04
Isopropyl alcohol	18.3
Benzyl alcohol	13.1
Mineral Oil (Typical)	4.5
Sorbitol solution	62.0
Syrup USP	56.0
Water	78.5

พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุคือพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเก็บอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า โดยมีสมการดังนี้

$$w_c(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) \quad J \quad \text{หรือ} \quad w_c(t) = \frac{1}{2} \frac{q^2(t)}{C} \quad J \quad (2.5)$$

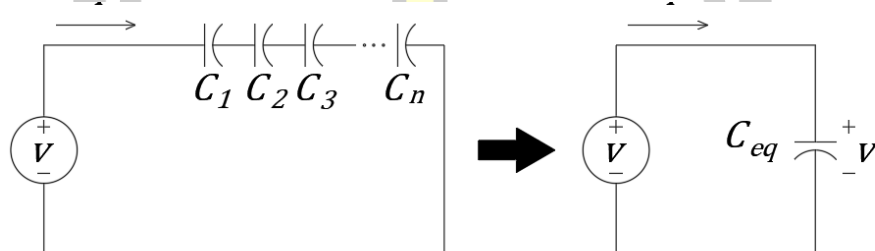
ตัวเก็บประจุในอุดมคติจะดูดกลืนหรือใช้พลังงานไม่ได้ ซึ่งต่างกับตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุได้แต่เก็บพลังงานไว้และสามารถจ่ายพลังงานนั้นออกมาได้ภายหลัง ตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุ 1 F มีแรงดันคร่อมอยู่ 10 V ดังนั้นพลังงานสะสมจะเป็น

$$w_c(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) = \frac{1}{2} \times 1 \times 10^2 = 50 \quad J \quad (2.6)$$

ถ้าตัวเก็บประจุที่มีพลังงานสะสมอยู่แล้ว ไม่ได้ต่อกับวงจรหรืออุปกรณ์อื่นๆ เลย กระแสจะไหลไม่ได้ ทำให้ ประจุ แรงดัน และพลังงาน ยังคงค้างอยู่ในตัวเก็บประจุเท่าเดิม ถ้านำตัวเก็บประจุนี้

มาต่อเข้ากับตัวต้านทานเป็นวงจร กระแสก็สามารถไหลได้ จนกระทั่งพลังงานสะสมถูกดูดกลืน กลายเป็นความร้อนที่ตัวต้านทานจนหมดและแรงดันที่คร่อมอุปกรณ์ทั้งสองก็จะกลายเป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมหรือขนานกันนั้นสามารถถูกแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุสมมูลตัวหนึ่งโดยค่าความเก็บประจุของมันสามารถหาได้ดังนี้ กรณีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันดังภาพที่ 3 โดยที่หาค่าความเก็บสมมูลได้จากสมการ

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.7)$$



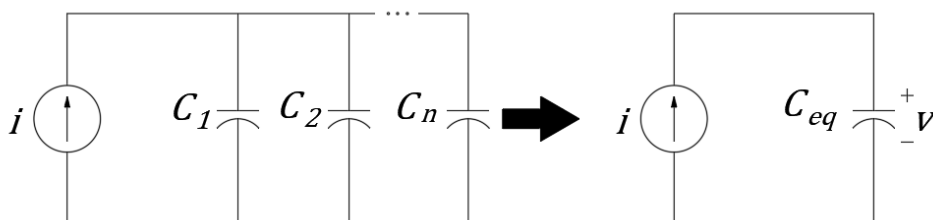
ภาพที่ 3 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม

จะเห็นว่า การรวมค่าความจุที่ต่ออนุกรมกันจะเหมือนกับการรวมค่าความต้านทานที่ต่อขนานกัน ดังนั้นในกรณีรวมค่าความเก็บประจุสองตัวจะเป็น

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.8)$$

สำหรับการรวมค่าความจุที่ต่อขนานกันดังภาพที่ 4 โดยที่หาค่าความเก็บสมมูลได้จากสมการ

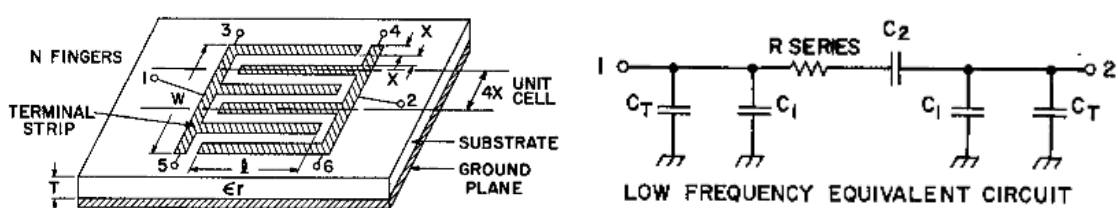
$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.9)$$



ภาพที่ 4 ตัวเก็บประจุต่อขนาน

2.2 อุปกรณ์ตรวจจับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (Interdigital Capacitor Sensor)

อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (Interdigital Capacitor Sensor) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการวัดและตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ ซึ่งมีการจัดเรียงซ้อนโดยมีระยะห่างเท่าๆ กันหรือเป็นวงแหวนขนาดเล็ก 2 เส้น ที่มีระยะห่างของเส้นเท่ากันตลอดความยาวของเส้น ซึ่งจะแบ่งแยกด้วยช่องว่างหรือช่องอากาศเล็กน้อยเพื่อสร้างความจุไฟฟ้า ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นทั้งสอง โดยอาจใช้ในการวัดค่าแรงดัน ความชื้น การเคลื่อนที่ หรือสารเคมีในสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ตามภาพที่ 5



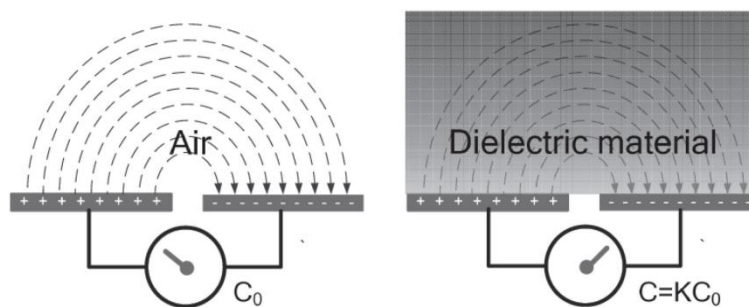
ภาพที่ 5 โครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (Interdigital Capacitor Sensor) [4]

ในปี 1970 Gary D. Alley [4] Interdigital Capacitor Sensor (IDCs) เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในการออกแบบวงจรความถี่สูง ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีในด้านขนาดที่กะทัดรัดและความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้รวดเร็ว โดย IDCs นั้นมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่แบ่งเป็นส่วนๆ ซึ่งทำให้เกิดพื้นที่โครงสร้างที่คล้ายคลึงกับช่องว่าง ทำให้ IDCs มีค่าความจุไฟฟ้าสูงและมีขนาดเล็ก การประยุกต์ใช้ IDCs ใน MICs เป็นการออกแบบวงจรความถี่สูงในรูปแบบขององค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ RF (Radio Frequency) โดยมีหลายวิธีการใช้ IDCs ใน MICs เช่น

1. การใช้ IDCs เป็นส่วนหนึ่งของตัวกรอง (Filter): IDCs สามารถใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งในการออกแบบและสร้างตัวกรองความถี่สูง เพื่อคัดกรองสัญญาณ RF และลดความถี่ไม่พึงประสงค์
2. การใช้ IDCs เป็นส่วนของตัวแบ่งสัญญาณ (Divider): IDCs สามารถใช้ในการแบ่งสัญญาณ RF ให้แบ่งเป็นสองสายที่มีความถี่เท่ากันหรือแตกต่างกัน ทำให้สามารถใช้งานในระบบสัญญาณ RF ที่ต้อง

อิตินันท์ ตะเภาน้อย [5] [6] กล่าวว่าตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor) เป็นตัวรับรู้ค่าคาปาซิแตนซ์ อีกรูปแบบหนึ่ง ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่าง ซี่ที่เป็นขั้วบวกกับซี่ที่เป็นขั้วลบ คล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าคาปาซิแตนซ์มากสามารถต่อการวัดค่าคาปาซิ

แดนซ์และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียว จึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรมีพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไปได้ เมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นตัวนำ มีประจุไฟฟ้าต่างกัันดังภาพที่ 17 ผลที่เกิดขึ้นคือค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างแผ่นตัวนำจะเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำไปวางวัสดุที่ต่างกัน จะมีค่าไดอิเล็กทริกแตกต่างกันด้วย เราจึงนำหลักการนี้ ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น การวัดสารพิษในอาหารทะเลการวัดปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ การวัดความชื้นในคอนกรีตหรือการวัดเพื่อจำแนกชนิด ของวัสดุ เป็นต้น

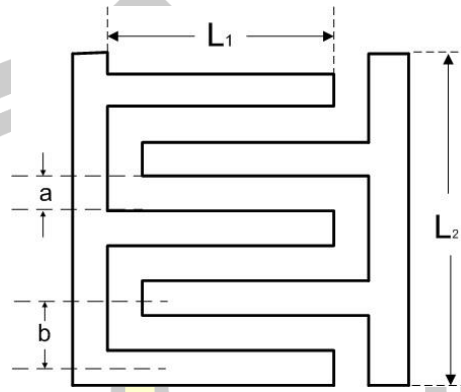


ภาพที่ 6 ค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกวางในสนามไฟฟ้า [5] [6]

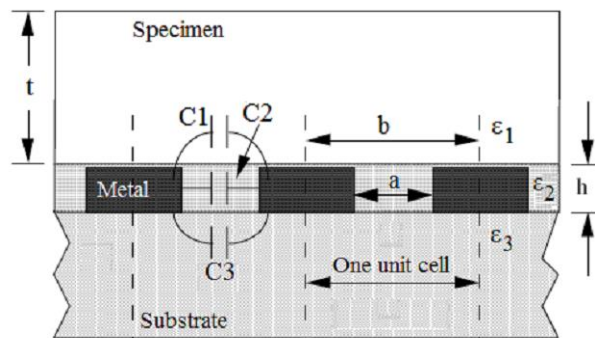
อินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์เป็นแผ่นวงจรมีพิมพ์ที่เป็นหลายชั้น ดังภาพที่ 6 โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้น เมื่อระดับไดอิเล็กทริกที่เกาะบนอิเล็กโตรดเปลี่ยนไปไดอิเล็กทริกก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิเจทัลมีโครงสร้างแบบหลายนิ้วที่มีระยะห่างเป็นระยะ ๆ ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิเจทัลมีค่าคาปาซิแตนซ์เกิดขึ้นที่ช่องว่างขนาดเล็ก ระหว่างตัวนำแบบฟิล์มบาง ค่าดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยเพิ่มจำนวนของนิ้วหรือใช้วัสดุที่มีชั้นบาง ๆ ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง ๆ เช่น ferroelectric ระหว่างตัวนำและซับสเตรท ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่างชั้นที่เป็นขั้วบวกกับชั้นที่เป็นขั้วลบคล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าคาปาซิแตนซ์มากกว่าง่ายต่อการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียวจึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรมีพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไป

Niwat Angkawisittpah และคณะ [7] กล่าวถึงเรื่องสมการการออกแบบ ดังโครงสร้างในภาพที่ 3.2-3.3 เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} ในสมการที่ 2 ที่สัมพันธ์กับสมการที่ 3 และ 4 โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m , ϵ_1 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์ (the relative permittivity) ของวัสดุที่ใช้ นำมาทดสอบเช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน , ϵ_2 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์ของวัสดุระหว่างทองแดง อิเล็กโตรด และ ϵ_3 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์ของวัสดุฐานรอง K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส (elliptic integrals of modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของชั้น b เป็นระยะความกว้างของ

อิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้อะดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ในสมการที่ 1 ประกอบด้วย L_1 คือความยาวของซี่ และ N คือจำนวนของซี่



ภาพที่ 7 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิทัล



ภาพที่ 8 แนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้อะดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล [7]

$$C = C_{UC} (N - 1) L_1 \tag{2.10}$$

$$C_{UC} = C_1 + C_2 + C_3 \tag{2.11}$$

$$C_{uc} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right)}{K \left(\frac{a}{b} \right)} + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \tag{2.12}$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์

C_{UC} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กทรอนิกส์ 1 คู่

N = จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์

L_1 = ความยาวของขี้อเล็กโทรดแต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างขี้อ

b = ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_0 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space)

มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_1 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน

ϵ_2 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_3 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง

K = ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส

2.3 ตัวรับรู้ระดับของเหลว

2.3.1 การใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลว

การใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลวคือการใช้อุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับและวัดระดับของเหลวในระบบการตรวจวัด จากนั้นตัวรับรู้ระดับจะแปลงข้อมูลที่ได้รับเป็นสัญญาณหรือข้อมูลที่เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนด เช่น ระดับของวัสดุที่อยู่ในถังเก็บ (hopper) หรือระดับของของเหลวในถัง ตัวรับรู้ระดับของเหลวสามารถมีหลายแบบตามวิธีการตรวจวัดที่ใช้ เช่น

1) ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่วัดระดับได้ตลอดเวลา

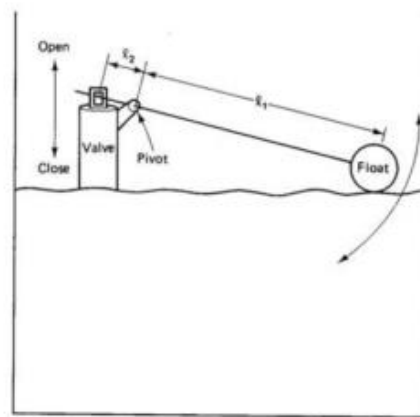
2) ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ที่ทำงานโดยการเปิดและปิด (หรือตัดกับวงจร) การใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลวเป็นเครื่องมือที่สำคัญในอุตสาหกรรม เพื่อวัดและควบคุมระดับเหลวให้เป็นไปตามต้องการ

2.3.2 การวัดระดับของเหลว

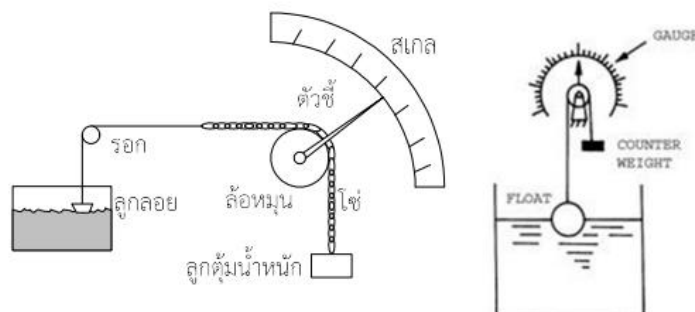
ในปัจจุบันการวัดระดับของเหลวมีหลากหลายวิธี เพราะการวัดระดับของเหลวมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรม เช่น เครื่องดื่ม อุตสาหกรรมเพื่อบริโภค การวัดปริมาณของน้ำมันในอุตสาหกรรมน้ำมัน ในถังพักหรือภาชนะบรรจุ เป็นต้น เนื่องจากระดับจะส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์อื่น ได้แก่ ความกดดันและอัตราการไหล การแบ่งอุปกรณ์การวัดระดับเหลว แบ่งตามหลักการด้านกายภาพได้ 4 แบบคือ

1) ตัวรับรู้ระดับของเหลวทางกลหรือ (Mechanical sensor) คืออุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการแรงพุงที่เดียวกับแรงของเหลวเพื่อวัดและตรวจจับระดับของเหลวในระบบการตรวจวัดแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวทางกล สามารถใช้หลากหลายวิธีการตรวจวัดระดับของเหลวได้ อย่างไรก็ตาม หลักการทำงานของตัวรับรู้ระดับของเหลวทางกลมักจะใช้หลักการของการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้

ระดับเหลวในเหลวที่ต้องการวัด ตัวอย่างของตัวรับรู้ระดับของเหลวทางกลใช้ในการวัดระดับเหลว ได้แก่ สวิตช์ลูกลอย (Float type sensor) ที่ใช้ลูกลอยในเหลว เมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้นหรือลดลง ลูกลอยจะเคลื่อนที่ตามระดับของเหลว และทำให้เกิดการเปิดหรือปิดวงจร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมหรือตรวจวัดระดับของเหลวในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี การใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลวทางกลเป็นวิธีการที่มีความจำเป็นมากในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการวัดระดับน้ำในถัง ระดับน้ำมันในหม้อน้ำ หรือถังเก็บน้ำมัน ระดับของเหลวในส่วนต่างๆ ของระบบการผลิต เป็นต้น ทำให้สามารถควบคุมและตรวจสอบระดับเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย การทำงานของตัวรับรู้ระดับเหลวแบบลูกลอยจะพบว่าตำแหน่งของวาล์วแปรผันกับระดับน้ำ คือ หากระดับน้ำลดลง ตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอยจะตกลงทำให้เปิดวาล์ว เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยจะลอยขึ้นไปผลักให้วาล์วปิดน้ำ หลักการทำงานจะเห็นว่าแขนและจุดหมุน (Pivot) เป็นการขยายแรงทางกล แรงที่จ่ายให้กับลูกลอยแล้วมีผลต่อวาล์วจะเป็นผลมาจากแฟกเตอร์ของ l_1 , l_2 ภาพที่ 5 และการตรวจรู้ระดับด้วยลูกลอยสามารถเพิ่มเพื่อแสดงหรือชี้ค่าในการบอกระดับ ภาพที่ 6

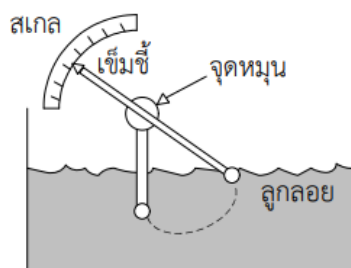


ภาพที่ 5 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยเพื่อ เปิด-ปิด ระบบควบคุม [8]



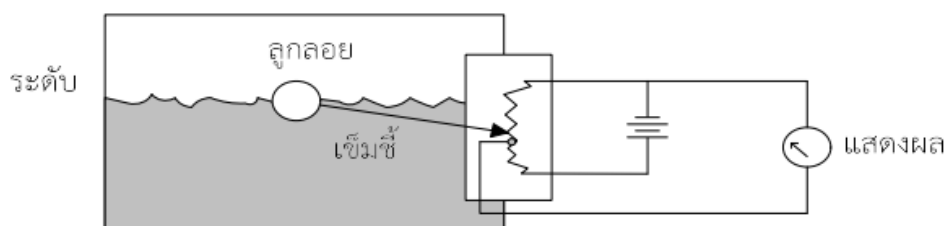
ภาพที่ 6 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอย เคลื่อนที่ตามระดับของเหลว [9]

ในภาพที่ 6 เป็นการตรวจวัดระดับโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอย โดยลูกลอยถูกต่อด้วยเส้นลวดหรือเทปหรือโซ่เพื่อแขวนผ่านรอก ปลายของลวดหรือเทปหรือโซ่ต่อกับลูกตุ้มตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอยสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างต่อเนื่องตามระดับความสูงหรือต่ำของน้ำ การวัดระดับโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอยแบบนี้ไม่เหมาะสำหรับการวัดระดับของของเหลวในภาชนะปิด เช่น ภาชนะเก็บน้ำหรือน้ำมัน เนื่องจากยากต่อการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอยออกมาข้างเครื่องอ่านค่าภายนอก ภาชนะเปิดที่มีขนาดใหญ่ เช่น ภาชนะเก็บน้ำหรือน้ำมัน สามารถใช้เครื่องมือวัดชนิดนี้ได้ ยานการใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 50 เมตรและมีความแม่นยำสูง การประยุกต์ใช้คานในการแสดงค่าหรืออ่านระดับในการวัดระดับแบบใช้ลูกลอยประกอบเข้ากับการขยับตัวขึ้นลงของตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอยทำให้คานเคลื่อนที่ โดยใช้จุดหมุน เช่นในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยประกอบเข้ากับคาน [9]

การใช้งานเพื่อให้เกิดความไวในการวัดระดับโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอย ตัวรับรู้ระดับแบบลูกลอยควรมีขนาดที่เหมาะสม โดยส่วนที่จมลงในของเหลวควรเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรทั้งหมดของตัวลูกลอย เครื่องวัดระดับแบบนี้มีโครงสร้างและการใช้งานที่ง่าย สามารถใช้งานร่วมกับชุดของโพเทนชิโอมิเตอร์หรือไมโครสวิทช์เพื่อใช้กับวงจรไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ควบคุม ดังที่แสดงตาม ภาพที่ 8

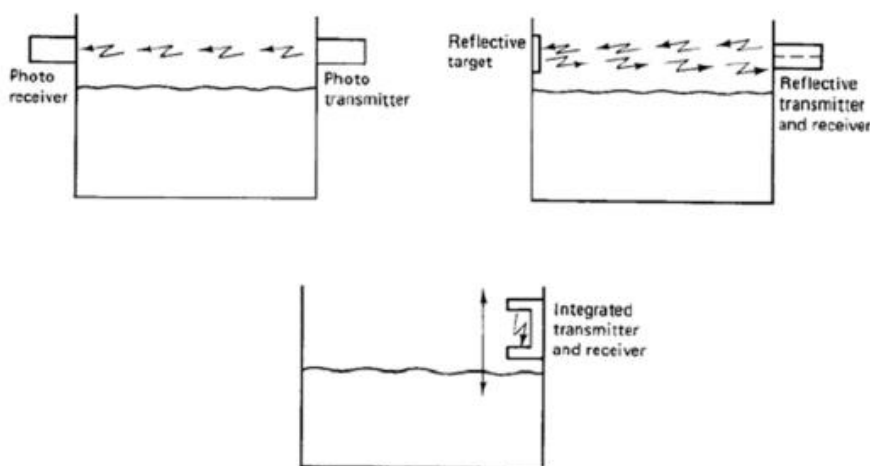


ภาพที่ 8 ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบลูกลอยประกอบเข้ากับชุดของโพเทนชิโอมิเตอร์ [9]

2) ตัวรับรู้ระดับของเหลวด้วยเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection) ใช้วิธีการทำงานทั้งแบบ อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ (Ultrasonic sensor) และ คลื่นเสียง (sonic wave) เพื่อวัดระดับของเหลวที่ต้องการ คลื่นอัลตราโซนิก มีความถี่ประมาณ 20-200 kHz และคลื่นเสียง มีความถี่น้อยกว่า 10 kHz ตัวรับรู้ระดับของเหลวทางเสียงจะติดตั้งที่ด้านบนถัง เพื่อส่งคลื่นไปยังผิวน้ำ

ของเหลวที่ต้องการวัด คลื่นจะสะท้อนกลับมายังตัวรับและถูกนำไปคำนวณระดับ โดยใช้แหล่งกำเนิด อัลตราโซนิกปล่อยคลื่นเสียงเพื่อกระทบที่ผิวของเหลวและสะท้อนกลับมายังตัวรับ คลื่นเสียงที่เดินทางมาที่ผิวอาจมาจากด้านบนลงมาหรือจากด้านล่างของภาชนะขึ้นไป โครงสร้างของตัวรับรู้ระดับและตัวส่งอาจติดตั้งอยู่ด้วยกันหรือแยกตัวรับและตัวส่งออกจากกัน

ตัวรับรู้ระดับของเหลวด้วยแสงใช้ไดโอดเปล่งแสงในการปล่อยแสงอินฟราเรด (infrared) ผ่านเลนส์ เพื่อให้ลำแสงกระจายออก ส่วนอุปกรณ์ตัวรับจะเป็นอุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์ไวแสง (photo transistor) แสงที่ถูกส่งออกไปต้องผ่านกรองเพื่อให้ได้เฉพาะความถี่แสงที่จะทำการตรวจจับเท่านั้น เมื่อระดับวัตถุอยู่ต่ำกว่าที่ตัวรับรู้ระดับของเหลว แสงจะส่องไปกระทบกับตัวรับแสง ทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์อิ่มตัวและให้สัญญาณลจิกต่ำออกมา แต่เมื่อระดับของวัตถุเพิ่มขึ้นและบังแสงโฟโตทรานซิสเตอร์จะปิด ภาพที่ 9 ในสภาวะที่ใช้กับไฟกระแสตรงต้องต่อตัวต้านทานดึงค่าขึ้น (pull-up) ระหว่างคอลเลกเตอร์เปิด (open collector) ของโฟโตทรานซิสเตอร์เพื่อให้ระดับของแรงดันที่ได้สูงขึ้น



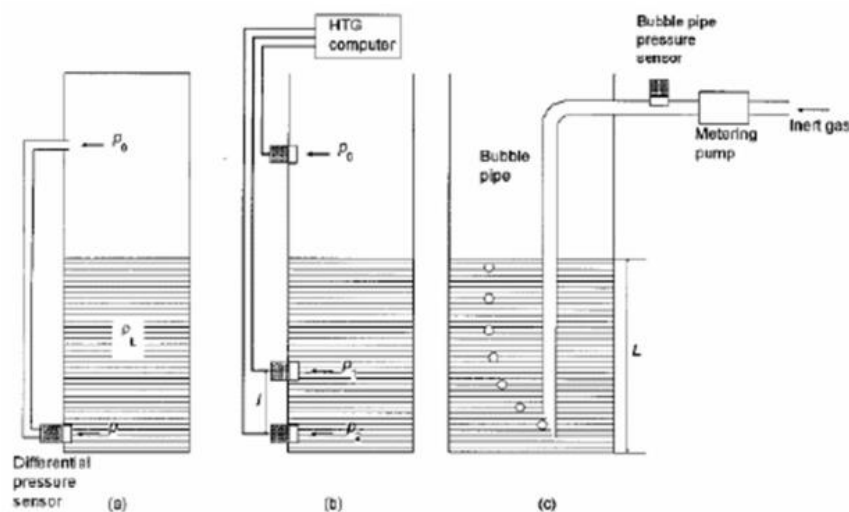
ภาพที่ 9 การวัดระดับน้ำโดยใช้หลักการของแสง [10]

ตัวรับรู้ระดับของเหลวด้วยแสงนำมาใช้งานมากเพิ่มขึ้น โดยใช้แสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายจากแหล่งกำเนิด แสงมีความยาวคลื่นยาวที่ตาคนมองเห็นระหว่าง 390 - 780 นาโนเมตร (nm) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยแสงทำงานในย่านคลื่นแสงนั้นมีความยาวคลื่นระหว่าง 780 - 3,000 นาโนเมตร (nm) แสงที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิดเรียกว่าโฟตอน (Photons) ความถี่ของคลื่นแสงมีหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) ความยาวคลื่นแสงคำนวณได้จากความเร็วการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงและความถี่ของคลื่นแสง

3) ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบใช้หลักการของความดัน ส่วนใหญ่ใช้ในการการวัด และควบคุมสถานะในถัง ในกรณีนี้การวัดจะต้องมีความเที่ยงตรงหรือการบอกระดับในถังที่เป็นเชิงเส้น พบว่า

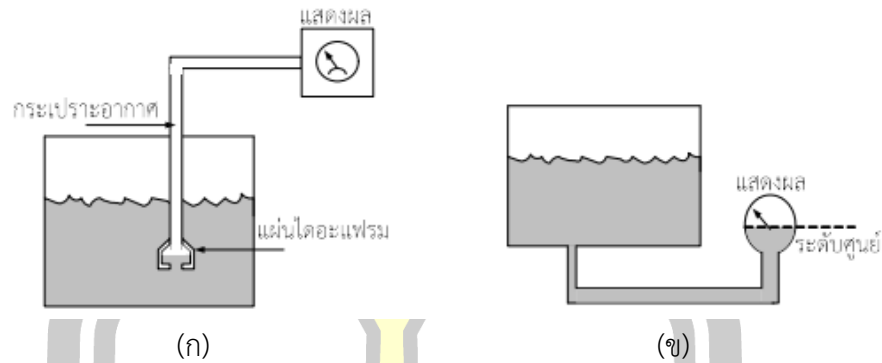
ความดันที่กั้นถังจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับระดับของเหลวในถังที่เรียกว่า "เฮด" (pressure head or static head, N/m²) ภาพที่ 10 แสดงการวัดระดับของเหลวในถังโดยใช้วิธีการวัดความดันที่กั้นถัง ควรพิจารณาข้อสำคัญดังนี้:

- 3.1) ของเหลวที่วัดควรมีคุณสมบัติเดียวกันตลอดเวลา หรือมีความหนาแน่นคงที่
- 3.2) หากไม่มีการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่กั้นถัง ต้องใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำการบวกหรือลบค่าออฟเซตบางตัวออกเพื่อให้ได้จุดศูนย์ที่ต้องการ
- 3.3) หากใช้ความดันด้านล่างของถังเป็นตัวบอกระดับ ในขณะที่ถังเปิดออกสู่อากาศ หรือในขณะที่ทรานสดิวเซอร์กลายเป็นเกจวัดความดัน (เปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศ) แต่ถ้าถังดังกล่าวถูกซีล (seals) แน่นอน ความดันด้านล่างจะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าเฮดนั้นเพียงอย่างเดียว โดยจะเปลี่ยนแปลงตามความดันด้านบนด้วย



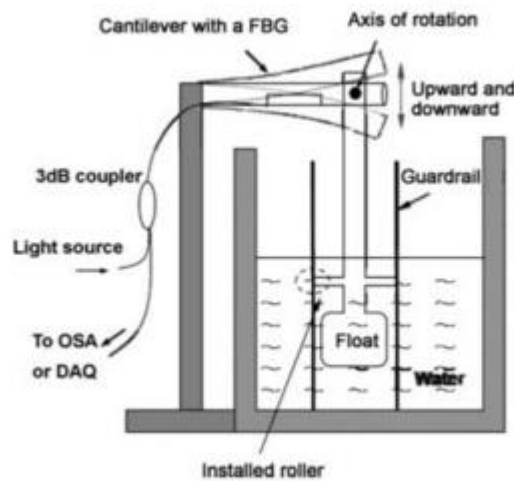
ภาพที่ 10 การวัดระดับของเหลวในถังโดยใช้วิธีการวัดความดันที่กั้นถัง [11]

การวัดระดับด้วยตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบความดันหรือน้ำหนักเป็นการวัดค่าความหนาแน่น, น้ำหนักจำเพาะ, พื้นที่ของภาชนะบรรจุ และความดันของเหลวเพื่อทราบระดับหรือความสูงของเหลวได้ วิธีการที่ใช้คือการใช้เกจ (Gauge) ในการวัดความดันเข้าไปที่ด้านล่างของภาชนะบรรจุของเหลว การเพิ่มหรือลดระดับความสูงของเหลวในภาชนะจะส่งผลให้ความดันเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนหน่วยของระดับในการวัดความดันให้อยู่ในหน่วยของการวัดระดับของเหลวแทน จะสามารถทราบระดับหรือความสูงของเหลวในภาชนะบรรจุได้ ตามภาพที่ 11 (ก) ซึ่งแสดงเหลวที่อยู่ในภาชนะ อีกทั้งการมีกระเปาะอากาศ (Air pocket) ร่วมกับแผ่นไดอะแกรม (Diaphragm) สามารถใช้ร่วมกันเพื่อส่งถ่ายความดันไปยังอุปกรณ์ที่แสดงค่าหรือควบคุมได้ ตามภาพที่ 11 (ข)



ภาพที่ 11 การวัดระดับโดยอาศัยแรงดัน [9]

การใช้เทคนิคการวัดโดยแสงและการใช้หลักของความดันเป็นวิธีการวัดระดับน้ำ ดังภาพที่ 12 มีขั้นตอนดังนี้ ใช้แกนกลขนาดเล็ก (cantilever beam) เป็นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในถังน้ำหรือตู้เก็บน้ำที่ต้องการวัดระดับน้ำ เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลง จะเกิดความดันที่เปลี่ยนแปลงในแกนกลขนาดเล็ก ทำให้เกิดโค้งหรือเปลี่ยนรูปร่างของแกนกลขนาดเล็ก ในขั้นตอนถัดไป จะใช้เทคนิคการใช้แฉวน้ำแสงที่อาศัยพื้นฐานของ fiber Bragg grating (FBG) ที่มีการรับรู้ความเปลี่ยนแปลงของความถี่สะท้อนเมื่อเส้นตามแกนของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลง

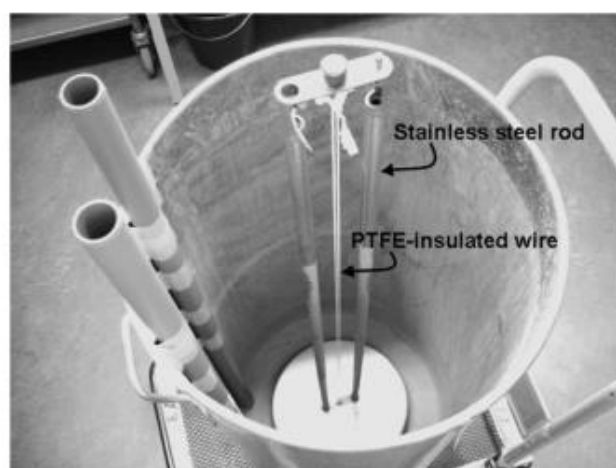


ภาพที่ 12 การจัดวาง FBG สำหรับวัดระดับน้ำ [12]

4. ตัวรับรู้ระดับของเหลวโดยอาศัยคุณสมบัติไฟฟ้า (Detecting electrical properties) การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าสัมพันธ์กับระดับของเหลว เช่น ค่าความต้านทาน การวัดค่าความจุไฟฟ้าค่าการนำไฟฟ้า การวัดความหนาแน่นของเหลว แต่เนื่องจากการวัดที่ต้องให้เซ็นเซอร์สัมผัสกับของเหลวโดยตรงจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวของตัวรับรู้แบบนี้ โดยเครื่องมือแบบคาปาซิแตนซ์โพรบ (Capacitance probe) เป็นตัวรับรู้รูปแบบหนึ่งที่อาศัยหลักการของสถานะความนำไฟฟ้าที่

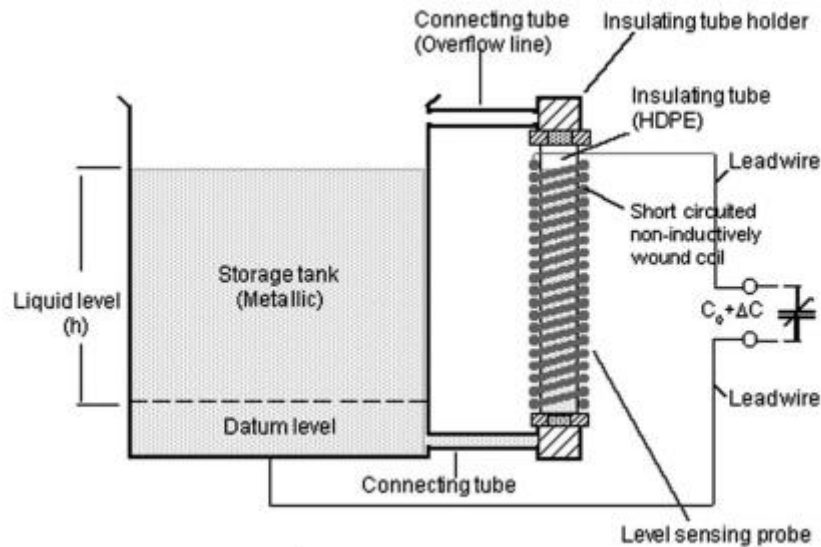
เปลี่ยนแปลงไปตามความสูงของระดับของเหลว เพื่อการวัดระดับของเหลวในถังทั่วไป สำหรับคาปาซิแตนซ์โพรงนี้ประกอบด้วยท่อตัวนำทรงกระบอก 2 ท่อวางซ้อนกันเสมือนตัวเก็บประจุทางไฟฟ้า เทคนิคการวัดนี้ใช้หลักการวัดความจุไฟฟ้า ตามภาพที่ 16 การต่อกราวด์กับขั้วไฟฟ้าโดยขั้วไฟฟ้าทำจากโลหะคือ แท่งสแตนเลสและเส้นลวดฉนวน PTEE (Polytetrafluoroethylene) ทดสอบวัดระดับของเหลวที่อยู่ในถังโลหะที่ต่อลงดิน ซึ่งจะได้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงในรูปเชิงเส้น ผลที่ได้ในการวัดระดับน้ำ 70 ซม. ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นน้อยกว่า 0.35 มม. และค่าความละเอียดมากกว่า 0.1 มม.

หลักการตรวจวัดระดับของเหลวโดยอาศัยการประยุกต์ค่าความจุไฟฟ้า ตามภาพที่ 13 เป็นเทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้ความจุไฟฟ้า โดยการวัดโดยหัววัดโดยไม่สัมผัสกับของเหลว อาศัยหลักการพันขดลวดรอบวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเชื่อมกับถังที่บรรจุของเหลว เช่น พลาสติก แก้ว เซรามิก เมื่อมีระดับของเหลวในถังเปลี่ยนแปลงจะทำให้ระดับของเหลวบริเวณหัววัดเปลี่ยนไปด้วย ทำให้ความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 13 การวางแท่งสแตนเลสและเส้นลวดฉนวน PTEE ในถังน้ำ [13]

พหุ ประถมศึกษา

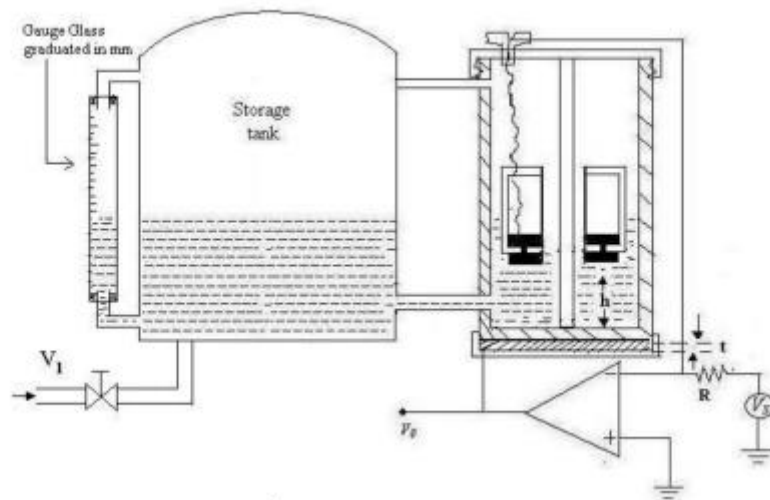


ภาพที่ 14 การวางขดลวดเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำเพื่อวัดค่าประจุไฟฟ้า [14]

การประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดระดับของเหลว ตามภาพที่ 15 เป็นวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อเนื่องโดยใช้ลูกลอย โดยประกอบด้วยลูกลอยที่มีลักษณะเป็นวงกลมหรือทรงกระบอกที่ถูกวางในท่อที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน โดยมีแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่ติดอยู่ด้านในและนอกฐานของลูกลอยและในถังน้ำจะมีแผ่นโลหะติดอยู่ เมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ลูกลอยและที่กันถังเพิ่มระยะขึ้น ทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้น สามารถทราบระดับน้ำได้ สามารถแบ่งการทำงานหรือสัญญาณเอาต์พุตของการวัดระดับเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) แบบที่สัมผัสกับวัตถุ โดยที่ตัวรับรู้ระดับของเหลวถูกจุ่มลงไปในตัวตลอดเวลา เช่น ตัวรับรู้ระดับของเหลวที่ใช้ความแตกต่างความดันและเทคนิคการใช้ใยแก้วนำแสง
- 2) แบบไม่สัมผัสกับวัตถุหรือการวัดจากภายนอก เช่น เทคนิคการใช้แสง LEDs และโฟโต้ทรานซิสเตอร์
- 3) แบบผสมทั้งสองแบบมารวมกัน เช่น การใช้ลูกลอยผสมกับหลักการของค่าความจุ จะพบว่ามีส่วนหนึ่งอยู่กับตัวตลอดเวลาอีกส่วนหนึ่งอยู่ภายนอก

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

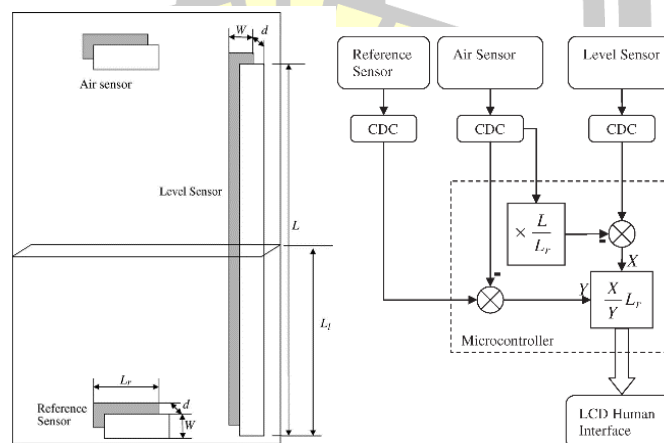


ภาพที่ 15 การประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดระดับของเหลว [14]

2.4 การปรับทัศนวิจารณ์งานวิจัย

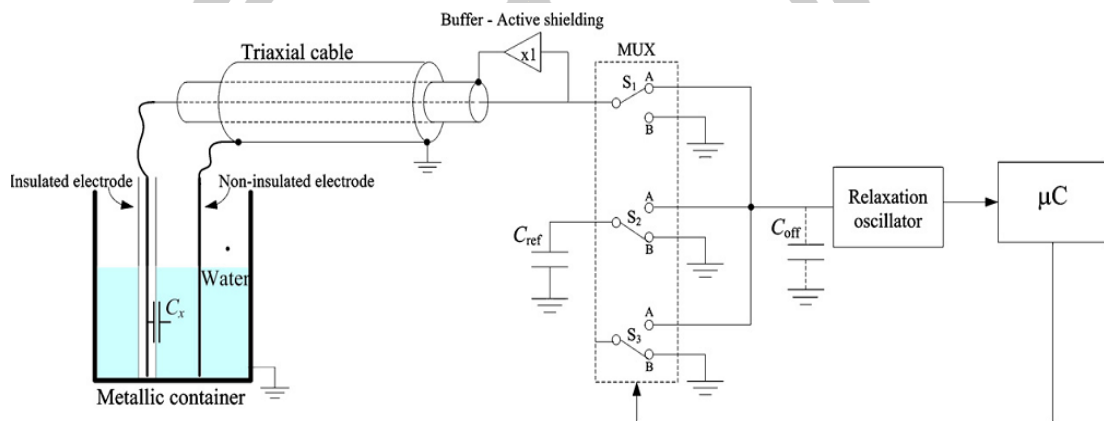
จากการปรับทัศนวิจารณ์กรรมการงานวิจัย หลายเรื่องในการพัฒนาตัวรับรู้ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำ มีหลากหลายรูปแบบ

Huseyin Canbolat และคณะ ปี 2009 [15] ได้พัฒนาเทคนิคการวัดระดับของเหลว โดยใช้การวัดค่าการเก็บประจุสามแบบ สำหรับวัดระดับของเหลว โดยใช้แท่งเหล็กยาวหรือเป็นแผ่นขนาดใหญ่ที่เป็นการวัดค่าการเก็บประจุเพื่อนำมาแปลงค่าวัดทางไฟฟ้า แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการเก็บประจุที่อยู่บนอากาศและในน้ำเป็นสื่อที่เปลี่ยนผืนผ้า นำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ แปลงค่าที่ได้ออกมาเป็นระดับของเหลว ตามภาพที่ 16



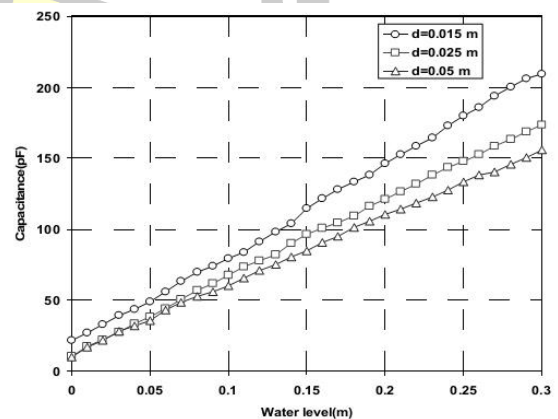
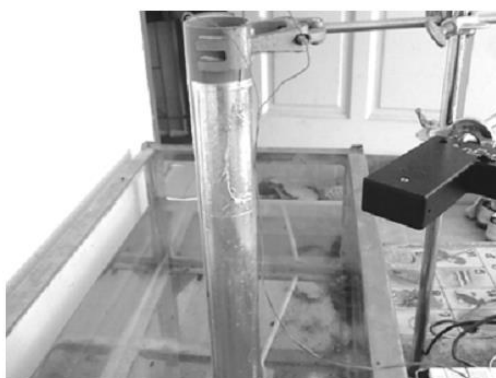
ภาพที่ 16 งานวิจัยเทคนิคโดยใช้การวัดค่าการเก็บประจุสามแบบสำหรับของเหลว [15]

Ferran Reverter และคณะ ปี 2011 [13] ได้มีการพัฒนาตัวรับรู้ระดับของเหลวอีกรูปแบบ โดยวัดค่าการเก็บประจุโดยใช้โลหะแท่งทรงกระบอกหุ้มด้วยฉนวน 1 ข้าง และอีก 1 ข้างไม่มีการหุ้ม ฉนวน และใช้การวัดระดับน้ำอ้างอิงเทียบกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง กับตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ต่อพื้นดินออกแบบเป็นแท่งทรงกระบอกเหล็กและได้ออกแบบวงจรสำหรับวัดค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ดัง ภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ระบบการวัดระดับน้ำอ้างอิงกับตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุต่อพื้นดิน [13]

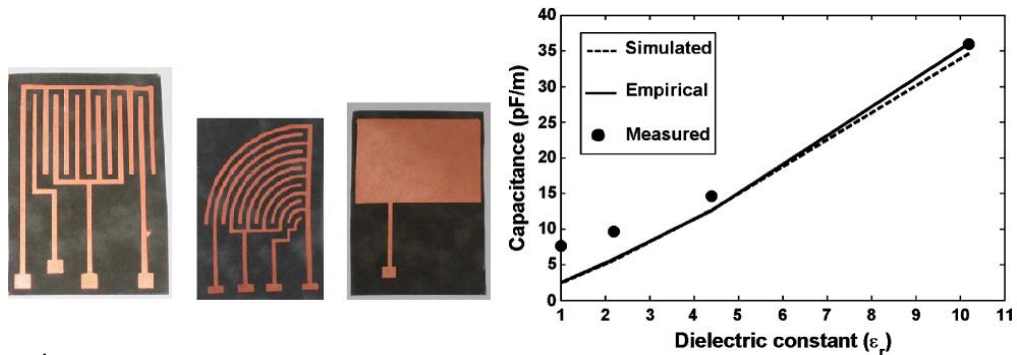
ศุภกร กตาทิการกุลและคณะ ปี 2011 [16] ได้พัฒนางานวิจัยการวัดระดับน้ำด้วยเทคนิคการ วัดความจุไฟฟ้าแบบทรงกระบอก โดยทำจากวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ มีคุณสมบัติเบา เหนียวและทน แรงดันสูง โดยสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำได้ตามภาพที่ 18 งานวิจัยดังกล่าวมีขนาดใหญ่ อุปกรณ์รวมมีน้ำหนักมาก เหมาะสมกับงานการวัดในระดับลึกที่มีความละเอียดน้อย



ภาพที่ 18 การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก [16]

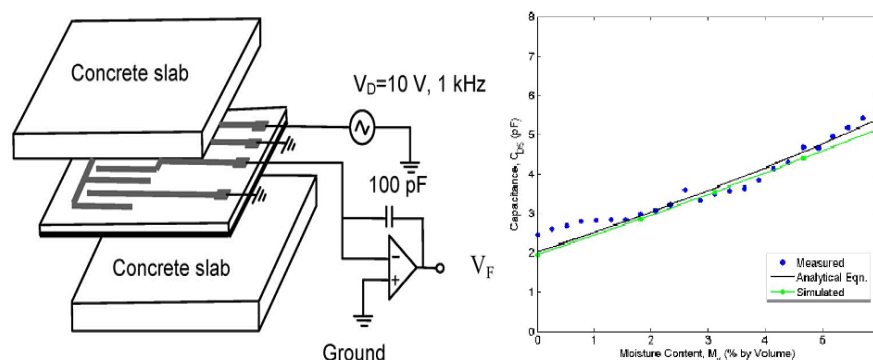
นักวิจัยบางส่วนได้ออกแบบตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor : IDC) หรือที่เรียกกันว่าอิเล็กโตรดซีทวิที่มีลักษณะเป็นการกัดสายบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ที่มีวัสดุฐานรอง (Substrate) วางแผ่นตัวนำในแนวระนาบและวางสลับกันขึ้นไปเพื่อทำให้เกิดคุณลักษณะการต่อขนานกันของค่าการเก็บประจุไฟฟ้า

Rashed H. Bhuiyan และคณะ ปี 2007 [17] ได้มีการออกแบบและพัฒนาตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคู่ขนานระยะใกล้สำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า ได้นำไปวัดความเป็นฉนวนของสายไฟ โดยเป็นตัวรับรู้บนแผ่น PCB แบบคู่ขนานดังภาพที่ 19 โดยนำค่าการเก็บประจุมาเปรียบเทียบกับค่าความเสียหายของฉนวนในลักษณะต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้า



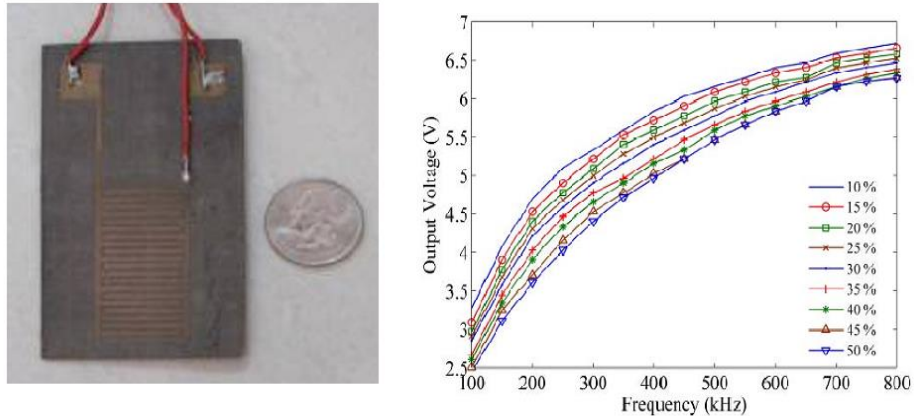
ภาพที่ 19 ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคู่ขนานระยะใกล้สำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า [17]

Md. Nazmul Alam และคณะ ปี 2010 [17] ได้พัฒนาการวัดความชื้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต โดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลสนามระยะใกล้ โดยสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลแบบคู่ขนานจ่ายสัญญาณ $V_p = 1$ โวลต์ ความถี่ 1 kHz และเส้นคู่ขนานอีกคู่นำสัญญาณผ่าน op-amp เพื่อขยายสัญญาณการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับค่าการเก็บประจุกับค่าความชื้นที่เกิดขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่มีในอากาศดังภาพที่ 20



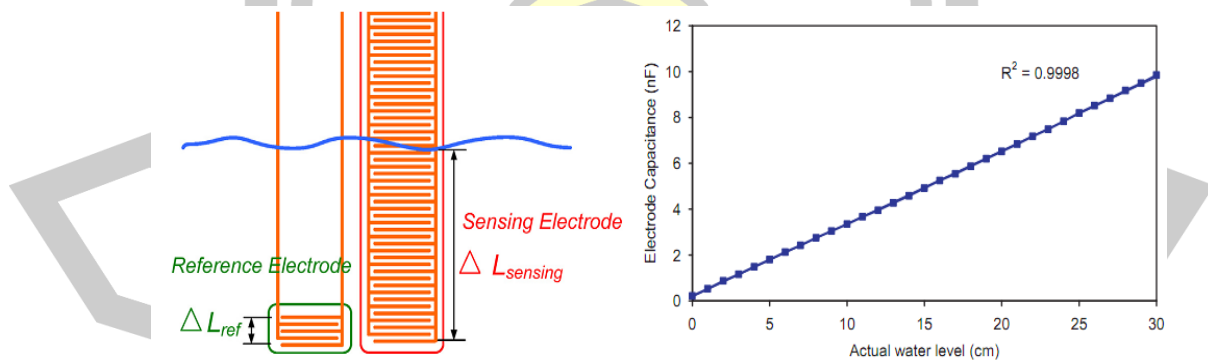
ภาพที่ 20 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลสนามระยะใกล้ [17]

Niwat Angkawisittpan และคณะ ปี 2012 [7] ได้ออกแบบและพัฒนาการวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยออกแบบตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบดิจิตอลเป็นคู่ขนานและสร้างวงจรกรองความถี่สูง (High-pass Filter) เพื่อเทียบสัญญาณขาออกเป็นแรงดันทางไฟฟ้าในสัญญาณขาขึ้น เพื่อวัดค่าร้อยละความเข้มข้นของน้ำตาลโดยผลการทดสอบค่า % ความเข้มข้นของน้ำตาลจะมีความแตกต่างกันตามสัญญาณที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุ แบบอินเตอร์ดิจิตอล [7]

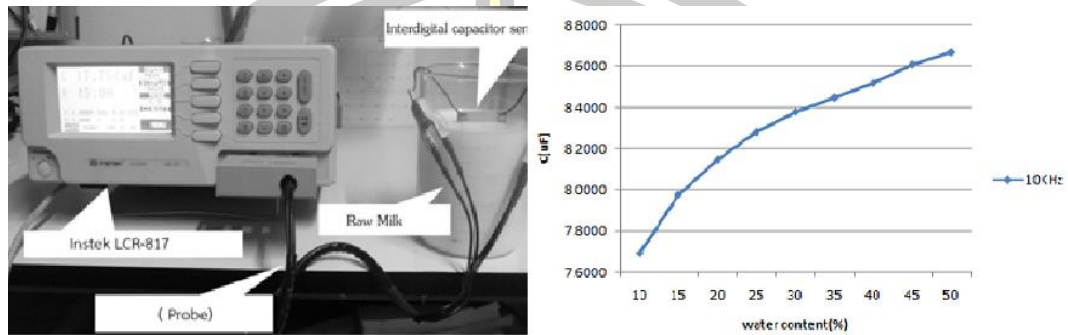
Kanadet Chetpattananondh และคณะ ปี 2014 [18] ได้พัฒนาในการวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล โดยสร้างชุดเปรียบเทียบเป็นตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ชุดเพื่อเทียบค่าความหนาแน่นของน้ำอย่างเดียว กับตัววัดระดับจริงและนำค่าจากตัวรับรู้ทั้ง 2 ตัวมาปรับเทียบเพื่อให้ได้ค่าความสูงของระดับน้ำที่แม่นยำขึ้น ประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อข้อมูลส่งไปยัง Display ที่สร้างขึ้นดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล [6]

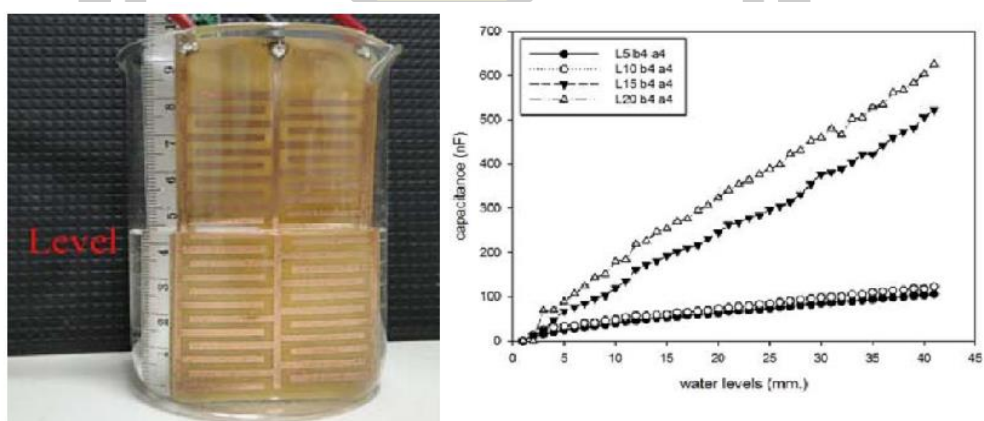
Songkrod Pimpisarn และคณะ ปี 2015 [19] ได้ศึกษาการวัดค่าการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีกราวด์เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความ

ต้านทานและค่าการเก็บประจุ ต่อการเติมน้ำในน้ำนมดิบ โดยนำตัวอย่างของน้ำนมดิบมาทำการวัด เพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุต่อเปอร์เซ็นต์การเจือจางของน้ำในน้ำนม มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ภาพที่ 23



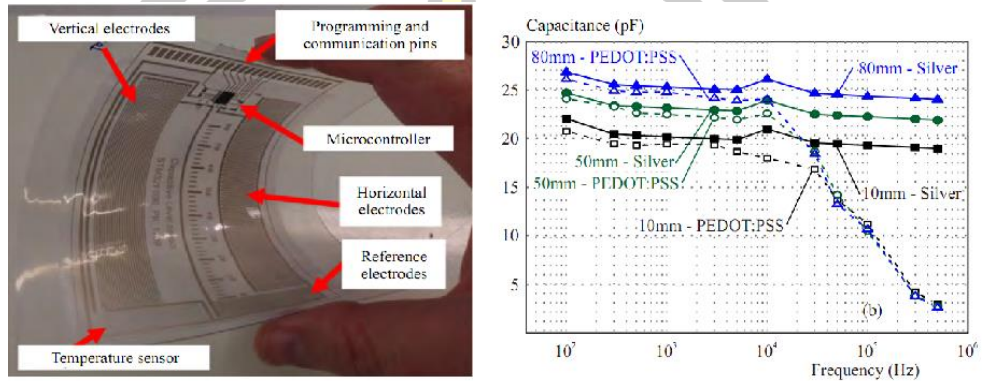
ภาพที่ 23 การวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม [19]

Sarawoot Boonkirdram และคณะ ปี 2015 [20] ได้ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลรูปแบบใหม่ โดยได้เพิ่มคุณสมบัติของค่าการเก็บประจุจากการออกแบบซึ่งลายวงจรรอก 2 ข้างเป็นซี่หวีเพื่อให้เกิดคุณสมบัติค่าการเก็บประจุที่มากขึ้น ใช้ในการวัดค่าระดับของเหลว โดยมีแนวคิดการออกแบบเพื่อการชดเชยช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างซี่ของอินเตอร์ดิจิตอล ดังภาพที่ 24



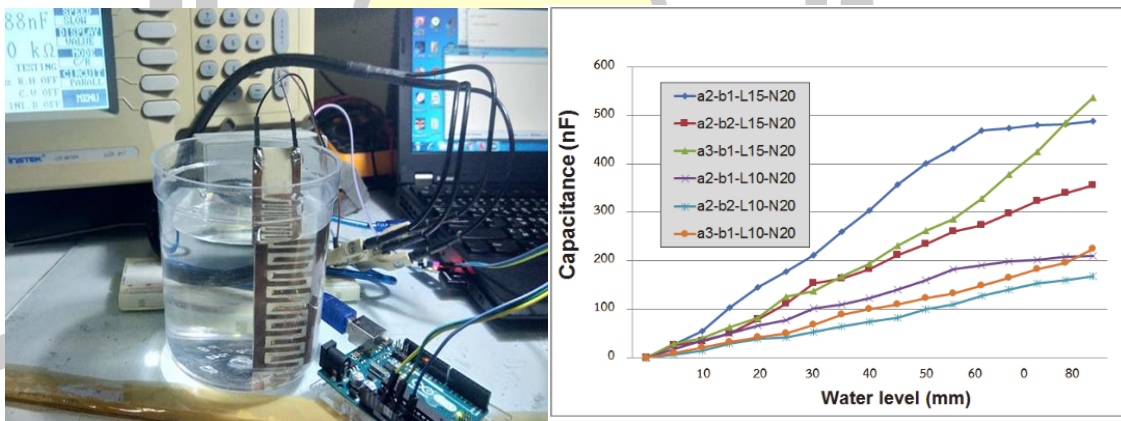
ภาพที่ 24 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่ [20]

Paval Kulha และคณะ ปี 2018 [21] ได้ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตัล รูปแบบใหม่ โดยการพิมพ์ลายของอิเล็กโทรดลงบนแผ่นหรือพื้นผิวที่ใช้เป็นฐานที่มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำ สำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุ เมื่อนำตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตัลลงแผ่นพลาสติกและลามิเนตที่มีคุณสมบัติในการอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพื่อนำไปวัดค่าระดับที่มีพื้นที่ผิวโค้งดัง ภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การพิมพ์และแผ่นอิเล็กโทรดสำหรับการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ [21]

Jagrapion Obma และคณะปี 2020 [22] ได้ออกแบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบใหม่ ที่ไม่มีฐานรองเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสของเหลวให้ทั่วถึง พบว่าค่าเก็บประจุที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นดัง ภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตอลแบบไม่มีฐานรอง [22]

การทบทวนบทความวิจัยเหล่านี้กล่าวมาขึ้นต้นยังมีจุดด้อยในเรื่องขนาดเนื่องจากงานอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ ทำให้เกิดความไม่ยืดหยุ่น หน้าสัมผัสของเหลวไม่สัมผัสตัวรับรู้ได้ทั่วถึง ส่งผลให้ค่าการเก็บประจุน้อยระยะการวัดที่ไม่ละเอียด ทำให้เกิดแนวคิดเทคนิคใหม่โดยบทความวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตัล 2 ข้าง แบบไร้วัสดุ

ฐานรอง โดยพิจารณาจากระดับของค่าการเก็บประจุที่มากขึ้นเมื่อทำการชดเชยช่องว่างของอินเทอร์ดิเจทัล โดยการเพิ่มจำนวนซี่เสมือนว่ามี อินเทอร์ดิเจทัลแบบไม่มีฐานรอง 2 ชุด เมื่อแปลงค่าการเก็บประจุเป็นข้อมูลนำไปใช้งานกับตัวประมวลผลนำไปใช้งานวัดระดับที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการและประยุกต์ด้านงานวัดระดับของเหลวที่ต้องใช้ความละเอียด สามารถพัฒนางานวิจัยเป็นระบบการวัดระดับน้ำที่มีมาตรฐาน และสามารถเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้ต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยซึ่งหลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิทัล 2 ข้าง แบบไร้วัสดุฐานรอง แล้วยนำทฤษฎีเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้ได้งานออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 ทฤษฎีและการออกแบบ
- 3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง
- 3.4 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 แผ่นทองแดง

แผ่นทองแดงขนาดความหนา 1 มิลลิเมตรในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิทัล 2 ทาง แบบไร้วัสดุฐานรอง ตัดด้วยเครื่องวายุคัต ตามภาพที่ 27 เนื่องจากวัสดุไม่ได้ถูกเชื่อมต่อกัน จึงจำเป็นต้องยึดหัวและท้ายด้วยแผ่นอะคริลิกใส เพื่อให้แผ่นอยู่ในระนาบและระดับที่ถูกต้อง



ภาพที่ 27 สร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิทัล 2 ทาง แบบไร้วัสดุฐานรอง

3.1.2 แผ่นวงจรพิมพ์ (FR4)

แผ่นวงจรพิมพ์ (FR4) ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ $\epsilon_r = 2.8$ ซึ่งในงานวิจัยจำทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุระหว่างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล 2 ทางแบบมีวัสดุฐานรองและไร้วัสดุฐานรอง เหมาะสมกับงานทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ระบบสื่อสาร

3.1.3 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน RLC Meter ยี่ห้อ Keysight รุ่น E4980A ที่มีคุณสมบัติความแม่นยำที่ 0.05%. โดยผ่าน Kelvin Clip ทำการวัดโดยใช้โหมมดวงจรขนาน สัญญาณความถี่ 1 KHz ที่ 1 Volt p-p ดังภาพที่ 28 โดยเชื่อมต่อระหว่างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้วัสดุฐานรองคาปาซิเตอร์แนวระนาบกับเครื่องวัดที่มีความถี่ 1 KHz แรงดันไฟฟ้า 1 โวลท์ ผ่านชุด Kelvin Clip Leads



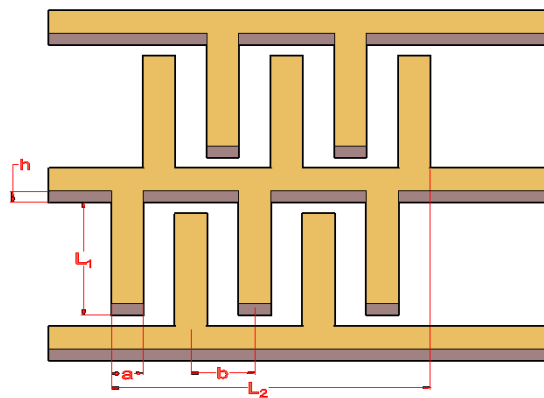
ภาพที่ 28 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

3.2 ทฤษฎีและการออกแบบ

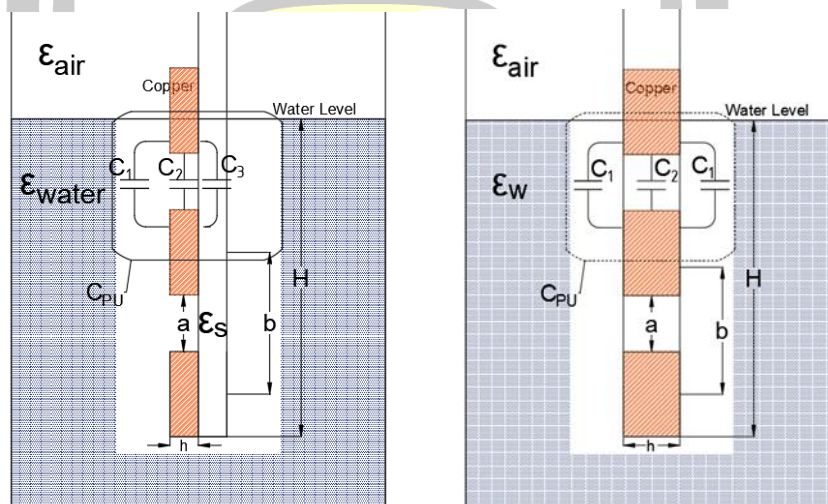
ทฤษฎีและการออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้าง จะใช้หลักการการขนานของแผ่นทองแดงโดยกำหนดให้แกนกลางอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้างเป็นขั้วลบ และด้านข้างทั้ง 2 ข้างเป็นขั้วบวก จะได้จำนวนของ+ของโดยเมื่อทองแดงมีการขนานกันเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าการเก็บประจุมีค่ามากขึ้นเช่นกัน แล้วนำค่าการเก็บประจุที่ได้นั้นไปแปลงค่าในระบบประมวลผลค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (Farad,F)

การออกแบบ ดังโครงสร้างในภาพที่ 29 และภาพที่ 30 เริ่มต้นจากหาค่า CUC ในสมการที่ 3.2 ที่สัมพันธ์กับสมการที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m , ϵ_1 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (the relative permittivity) ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบเช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน , ϵ_2 คือค่า

ความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด และ ϵ_3 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส (elliptic integrals of modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของซี่ b เป็นระยะความกว้างของอิเล็กโทรด ต่อมาเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ในสมการที่ 1 ประกอบด้วย L_1 คือความยาวของซี่ และ N คือจำนวนของซี่ [22]



ภาพที่ 29 ภาพด้านบนของโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้าง



ภาพที่ 30 ภาพตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ก)แบบมีฐาน ข) แบบไม่มีฐาน

$$C = C_{UC}(N - 1)L_1 \quad (3.1)$$

$$C_{UC} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.2)$$

แบบมีฐานรอง

$$C_{uc} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K\left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}\right)}{K\left(\frac{a}{b}\right)} + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (3.3)$$

แบบไม่มีฐานรอง

$$C_{uc} = \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{K\left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}\right)}{K\left(\frac{a}{b}\right)} + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (3.4)$$

สมการค่าการเก็บประจุเมื่อแช่น้ำ

$$C_{electrode} = (2N_{air} - 1)L_1 C_{air} + (2N_{water} - 1)L_1 C_{water} \quad (3.5)$$

โดยที่

C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กโทรด

C_{UC} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กโทรด 1 คู่

N = จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กโทรด

L_1 = ความยาวของซี่อิเล็กโทรดแต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างซี่

b = ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_0 = Permittivity of free space (8.854×10^{-12} F/m)

ϵ_1 = Relative Permittivity of Material Under Test (MUT)

ϵ_2 = Relative Permittivity of Material Between Electrodes

ϵ_3 = Relative Permittivity of Substrate

K = ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส

โดยทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบ
ดั้งเดิมโดยการคำนวณจากการแทนค่าในสมการที่ 3.1-3.4 เพื่อหาค่าการเก็บประจุในสมการที่ 3.5

ค่าพารามิเตอร์คือ $h = 1 \text{ mm}$, $a = 1 \text{ mm}$, $b = 2 \text{ mm}$, $L_1 = 15 \text{ mm}$ and $N = 20$ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่างคือ $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, และค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง FR4 $\epsilon_3 = 2.6-4.6$. โดยคำนวณค่าการเก็บประจุจากสมการที่ 1 – 4 แต่เนื่องจากถ้ามีการตรวจวัดระดับน้ำจะมีค่าไดอิเล็กทริกมากกว่าอากาศประมาณ 80 เท่าและจะทำให้ค่าการเก็บประจุแปรผันตามตามค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นทองแดงอิเล็กทรอนิกส์กับน้ำตามระดับที่เกิดขึ้น

3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง

เมื่อทำการออกแบบในหัวข้อที่ 3.2 ตามสมการแล้วในสมการที่ 3.1-3.4 จึงได้ทำวิธีการทดลองขึ้นเพื่อพิสูจน์ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบมีวัสดุฐานรองและแบบไร้วัสดุฐานรอง โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

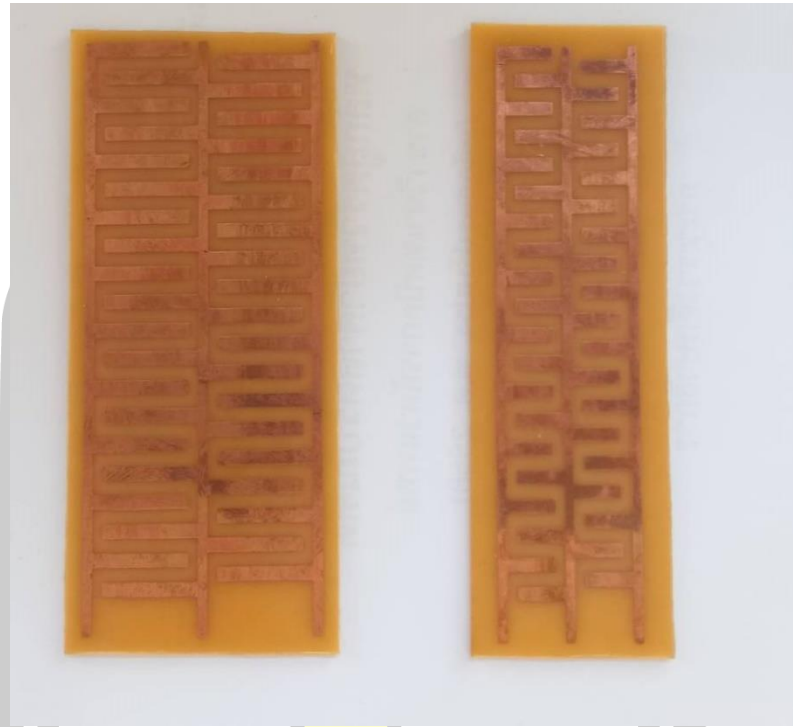
3.3.1 วิธีการสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง

การสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแรกคือแบบมีฐาน โดยออกแบบเป็น 3 ขนาดตามตารางที่ 3.1 โดยการสร้างวัสดุฐานรองจะใช้ แผ่นปรินซ์นิท FR4 มีค่าค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุที่ $\epsilon_r = 2.6 - 4.6$ ดังภาพที่ 3.5

ต่อมาเป็นการสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่สองคือแบบไร้วัสดุฐานรอง โดยออกแบบเป็น 3 ขนาดเช่นกันตามตาราง 2 โดยนำแผ่นทองแดงขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขนาดไว้ในตาราง 2 ดังภาพที่ 3.6

ตารางที่ 2 ตัวอย่างขนาดตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีวัสดุฐานรอง และไม่มีฐานรอง

IDC model	b (มม.)	a (มม.)	L (มม.)
1	1	1	5
2	1	1	10
3	1	1	15



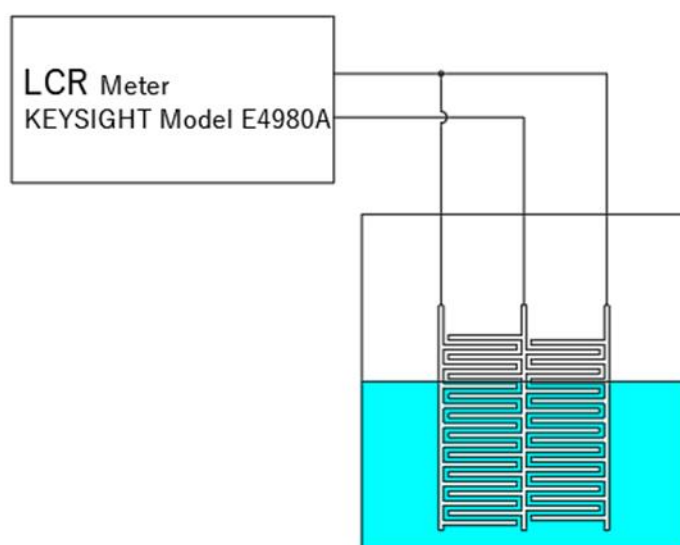
ภาพที่ 31 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอ์ดิจิทัล(FR4) 2 ข้างแบบมีฐานรอง



ภาพที่ 32 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง แบบไร้ฐานรอง

3.3.2 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

เมื่อการสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลทั้งสองแบบแล้วนำมาวัดค่าการเก็บประจุโดยใช้เครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ Keysight รุ่น E4980A ที่มีคุณสมบัติความแม่นยำที่ 0.05%. โดยผ่าน Kelvin Clip ทำการวัดโดยใช้โหมมดวงจรขนาน สัญญาณความถี่ 1 KHz ที่ 1 Volt_{pp} โดยแต่ละขนาดทั้งสองแบบจะวัดค่าระดับตั้งแต่ 0 มิลลิเมตร จนถึงระดับ 80 mm โดยช่วงวัดครั้งละ 2 mm จำนวน 40 ช่วงวัด โดยวัดช่วงละ 3 ซ้ำเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการวัดค่าการเก็บประจุ ต่อมาการนำ ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง แบบมีวัสดุฐานรองและไร้วัสดุฐานรองตามตารางที่ 2 วิธีการทดลองวัดการประยุกต์ใช้งานการวัดและประมวลผลโดยใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลผ่านโมดูลขยาย LM393 ประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงผลผ่าน Serial Monitor เพื่อทำการเปรียบเทียบกับ LCR Meter โดยแต่ละโมเดลจะวัดค่าตั้งแต่ 0-80 mm โดยช่วงวัดครั้งละ 2 mm จำนวน 20 ช่วงวัด โดยวัดช่วงละ 3 ซ้ำเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการวัดค่าการเก็บประจุ ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 แผนภาพการวัดค่าการเก็บประจุกับเครื่องวัด LCR Meter

3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล โดยนำมาออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้วัสดุฐานรอง ดังต่อไปนี้

- 1) ทำการออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้าง จากทฤษฎี ทั้งแบบมีวัสดุฐานรอง และแบบไร้วัสดุฐานรอง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างจริง
- 2) ทำการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้าง จากทฤษฎีทั้งแบบมีวัสดุฐานรอง 6 ขนาด และแบบไร้วัสดุฐานรอง 6 ขนาด
- 3) เก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยวัดค่าการเก็บประจุจากเครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ Keysight รุ่น E4980A ทำการเก็บข้อมูล ทั้งแบบมีวัสดุฐานรอง 6 ขนาด และแบบไร้วัสดุฐานรอง 6 ขนาด โดยแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุเริ่มต้นที่ 0 มิลลิเมตรไปจนถึง 100 มิลลิเมตรจำนวน ย่านวัดละ 5 มิลลิเมตร 20 ค่า ทำการทดสอบแต่ละย่านวัดซ้ำกันจุดละ 3 ซ้ำและนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ หาค่าทางสถิติ ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง ค่าการกระจาย
- 4) ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของงานทดลอง เพื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นลำดับ ดังนี้

- 4.1 ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.2 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง
- 4.3 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบไม่มีฐานรอง
- 4.4 ผลวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง
- 4.5 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง

4.1 ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง และไม่มีฐานรอง จากเครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ Keysight รุ่น E4980A ทำการเก็บข้อมูล ทั้งแบบมีฐานรอง 3 ขนาด และแบบไม่มีฐานรอง 3 ขนาด โดยแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุเริ่มต้นที่ 0 มิลลิเมตรไปจนถึง 80 มิลลิเมตรจำนวนย่านวัดละ 5 มิลลิเมตร 20 ค่า ทำการทดสอบแต่ละย่านวัดซ้ำกันจุดละ 3 ครั้ง และนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ หาค่าทางสถิติ ค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง

4.2 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรอง

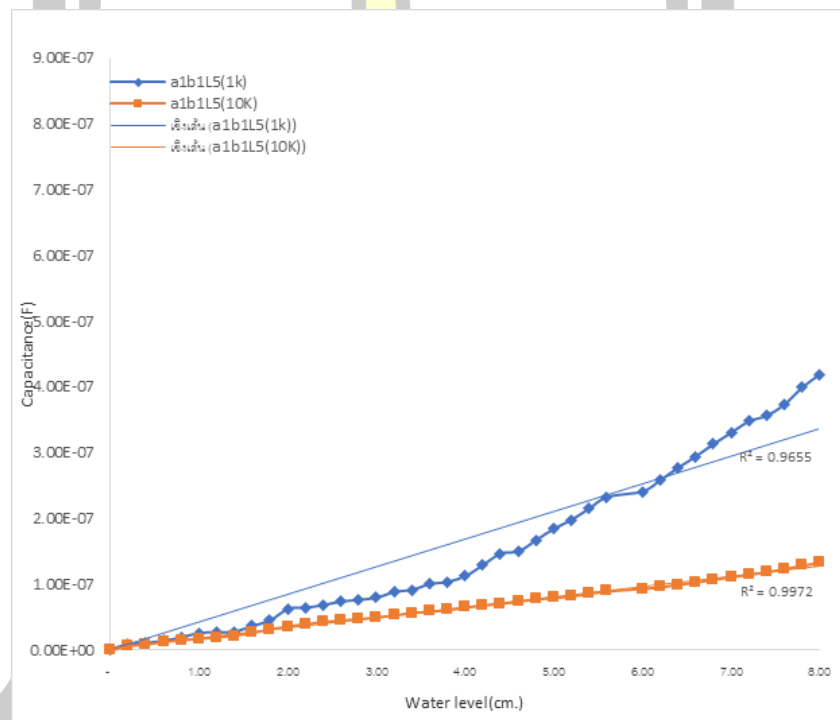
ผลการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง (FR4) ที่มีค่า $\epsilon_r=2.8$ จำนวน 3 แบบ ได้ผลการทดลองดังตาราง 4

ตารางที่ 3 ผลการค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรองก่อนการทดลอง ที่ระดับน้ำต่ำสุดและสูงสุด

ระดับน้ำ	a1b1L5		a1b1L10		a1b1L15	
	a1b1L5(1k)	a1b1L5(10K)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(10K)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(10K)
-	1.78E-09	3.90E-11	3.46E-08	2.70E-09	4.92E-08	1.49E-10
0.20	9.20E-09	6.80E-09	5.18E-08	1.01E-08	8.36E-08	1.20E-08

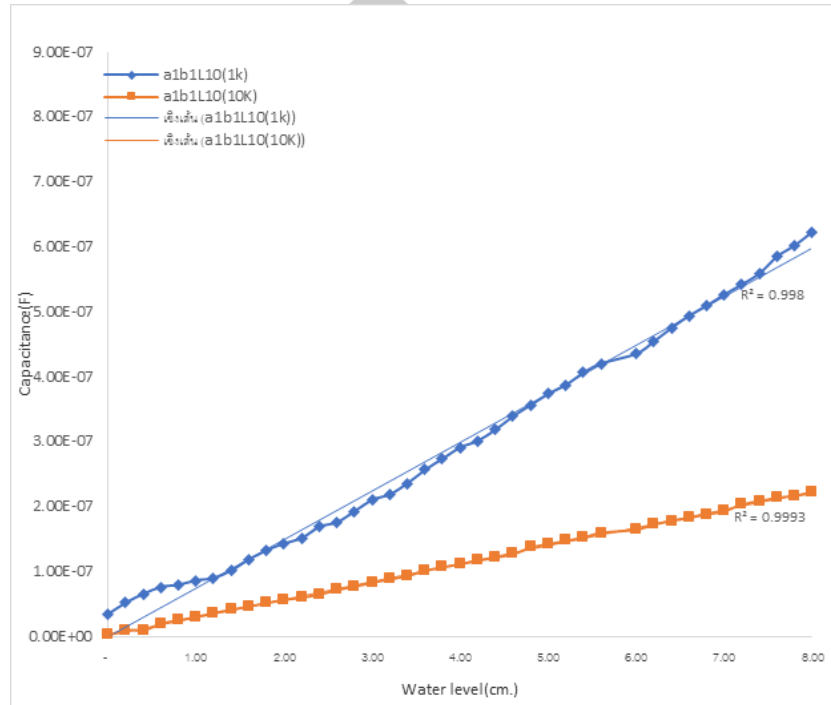
8.00	4.20E-07	1.34E-07	6.23E-07	2.22E-07	9.10E-07	4.20E-07
------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

- ตัวรับรู้อแบบมีฐานรอง แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.78 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 9.20 – 420 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9655 แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.03 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 6.80 – 135 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9972 ตามภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อแบบมีฐานรอง แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

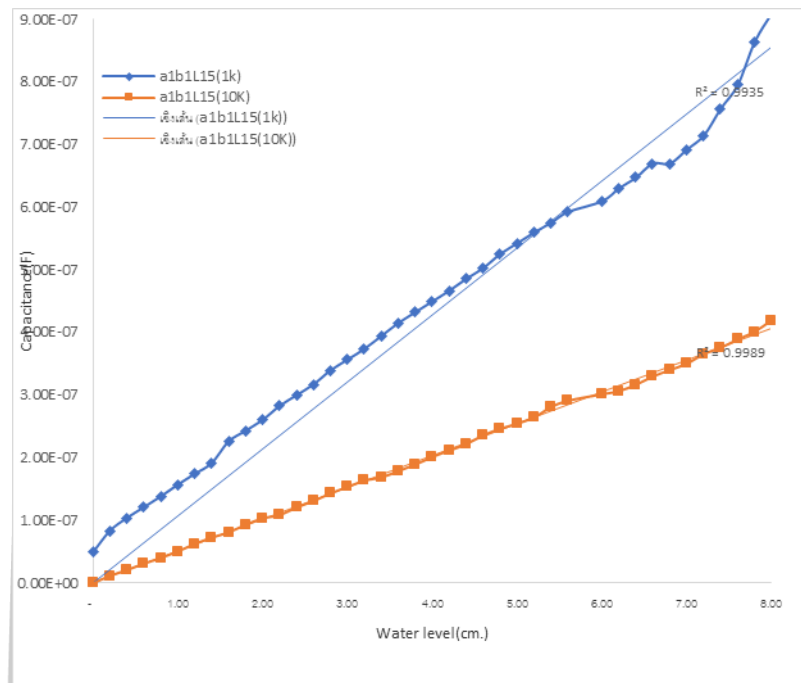
- ตัวรับรู้อแบบมีฐานรอง แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.78 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 51.80 – 623.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9980 แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.70 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 10.10 – 222.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9993 ตามภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบมีฐานรอง แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

- ตัวรับรู้แบบมีฐานรอง แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 49.22 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 83.60 – 910.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9935 แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.14 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 12.00 – 420.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9989 ตามภาพที่ 36

พูน ปณ ทิโต ชเว



ภาพที่ 36 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรอง แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

4.3 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรอง

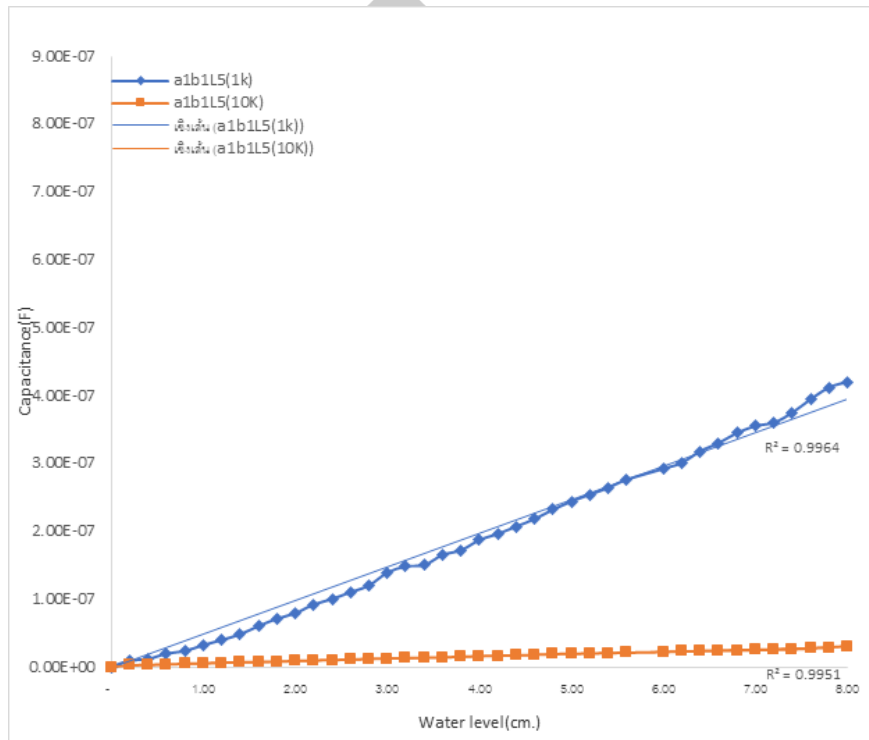
ผลการวัดค่าการเก็บประจุแบบไม่มีฐานรองแผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 3 แบบ ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการวัดค่าการเก็บประจุแบบไม่มีฐานรองก่อนการทดลอง ที่ระดับน้ำต่ำสุดและสูงสุด

ระดับน้ำ	a1b1L5		a1b1L10		a1b1L15	
	a1b1L5(1k)	a1b1L5(10K)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(10K)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(10K)
-	6.20E-11	3.90E-11	1.64E-10	2.70E-09	3.20E-08	1.49E-10
0.20	9.20E-09	2.40E-09	5.00E-08	1.12E-08	1.02E-07	1.20E-08
8.00	4.20E-07	3.10E-08	1.73E-06	1.30E-07	1.97E-06	1.70E-07

- ตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรอง แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.06 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรองที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 9.10 – 421 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9964 แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ

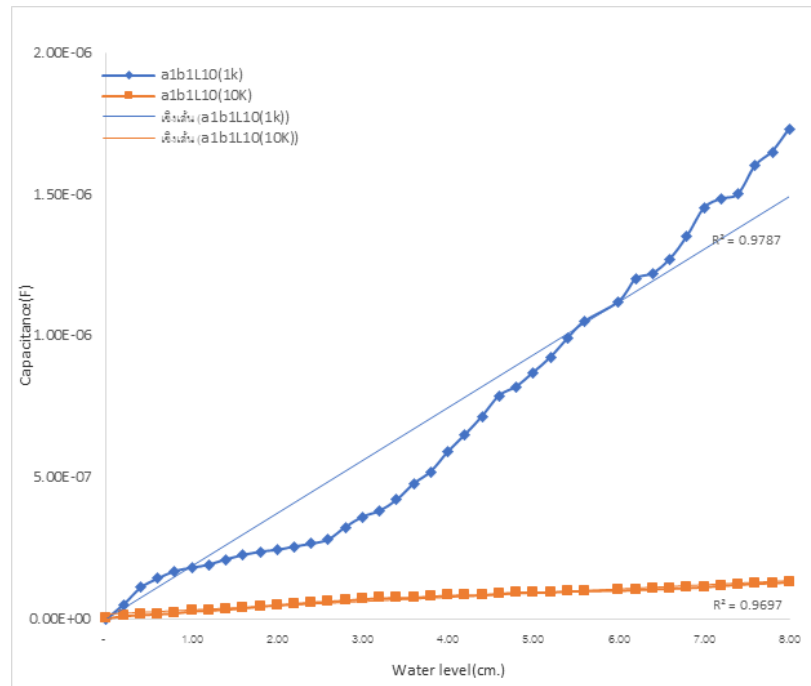
0.04 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 2.40 – 31.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9951 ตามภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 1 (a1-b1-L5) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

-ตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.16 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 50.00 – 1,730.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9980 แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.70 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 10.10 – 222.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9993 ตามภาพที่ 38

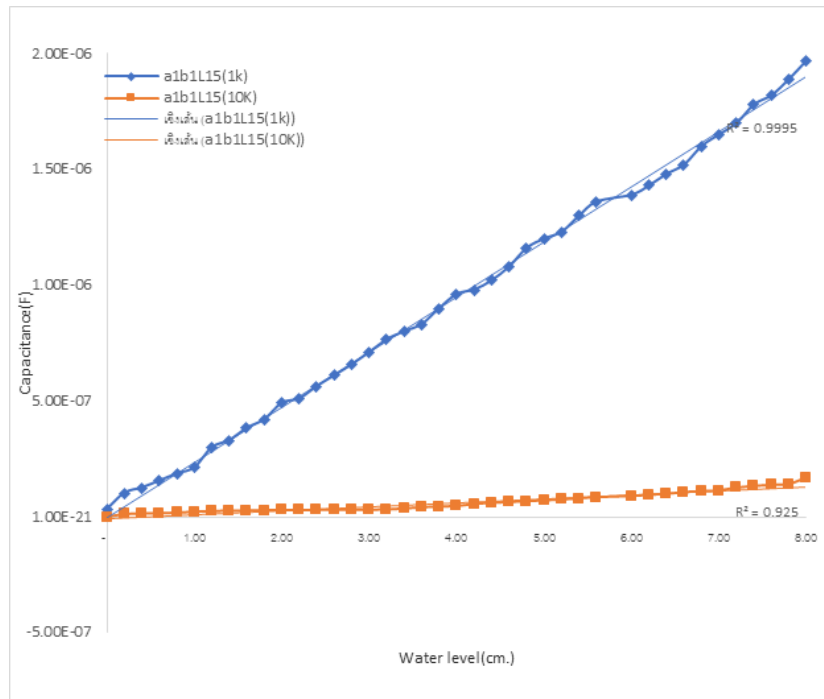
พูน ปณ ทิโต ชเว



ภาพที่ 38 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 2 (a1-b1-L10) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

- ตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 32.00 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.12 – 1.97 ไมโครฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9995 แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุก่อนทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.14 นาโนฟารัด ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 12.00 – 170.00 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9250 ตามภาพที่ 39

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 39 ผลของค่าการเก็บประจุของตัวฐานรอง รั้วรับแบบไม่มี แบบที่ 3 (a1-b1-L15) ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

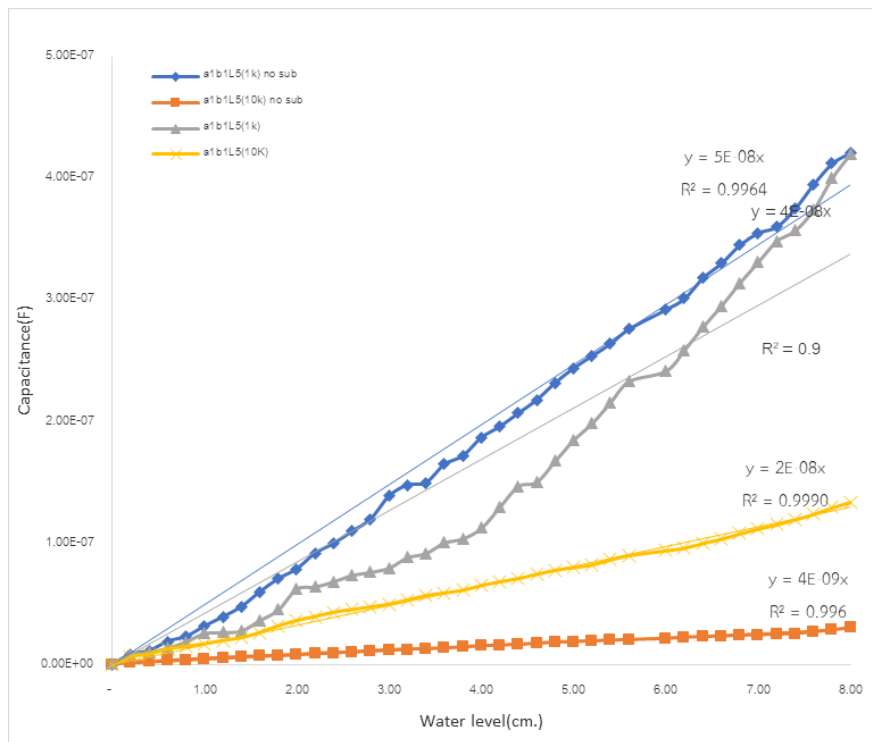
4.4 ผลวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรั้ว 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง

จากผลการทดลองนำค่าเก็บประจุของตัวรับรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองในแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาความแตกต่างของค่าเก็บประจุแต่ละตัว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาตัวรับรั้วที่มีค่าการเก็บประจุที่มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

- การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L5 ได้ค่าการเปรียบเทียบตามตาราง 6 และภาพที่ 40

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบนำค่าเก็บประจุของตัวรับรั้วแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L5

ชนิดตัวรับรั้ว	ความถี่	ต่ำสุด	มากที่สุด	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)	สมการความสัมพันธ์
a1b1L5	(1k)	9.20E-09	4.20E-07	0.9655	$y = 4E-08x$
	(10K)	6.80E-09	1.34E-07	0.9990	$y = 2E-08x$
a1b1L5 no sub	(1k)	9.10E-09	4.21E-07	0.9964	$y = 5E-08x$
	(10K)	2.40E-09	3.10E-08	0.9960	$y = 4E-09x$



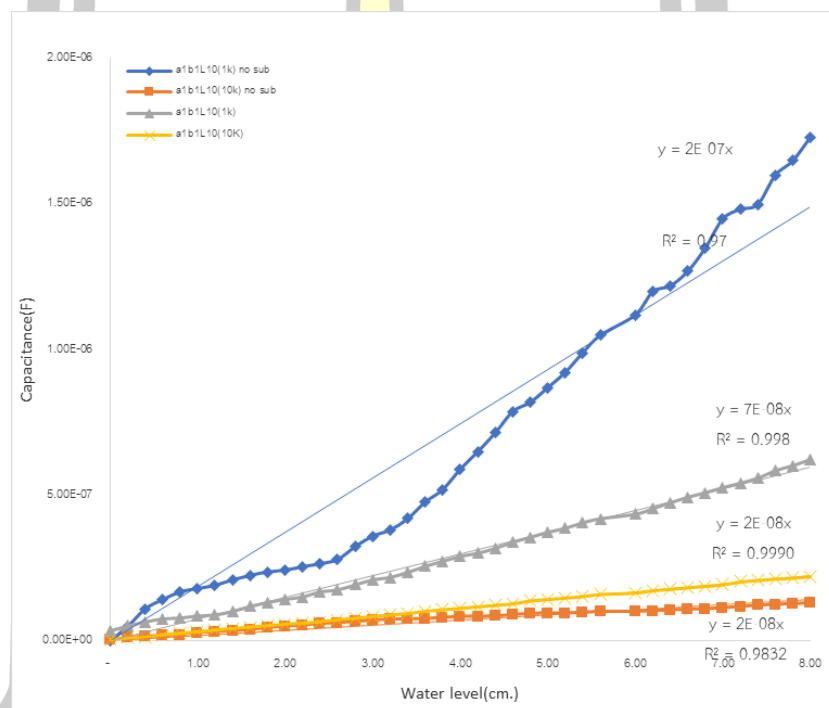
ภาพที่ 40 เปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L5 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุโดย วัดจากเครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรอง และแบบไม่มีฐานรองโดยใช้ตัวรับรู้อยู่แบบที่ 1 (a=1mm,b=1mm ,L=5mm) ดังตารางที่ 6 และภาพที่ 40 จะพบว่า ค่าการเก็บประจุตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้ สูงกว่าค่าการเก็บประจุตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 1kHz โดยเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรองมีค่ามากกว่า คือ $Y = 5 \times 10^{-8}X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9964 เส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรอง คือ $Y = 4 \times 10^{-8}X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.965 ค่าการเก็บประจุตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้ น้อยกว่าการเก็บประจุตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 10kHz โดยเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรอง มีค่าน้อยกว่า คือ $Y = 4 \times 10^{-9}X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9990 เส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรอง คือ $Y = 2 \times 10^{-8}X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9960

- การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L10 ได้ค่าการเปรียบเทียบตามตาราง 7 และภาพที่ 41

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบนำค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อย่างมีฐานรองและไม่มีฐานรองแบบ a1b1L10

ชนิดตัวรับรู้อย่าง	ความถี่	ต่ำสุด	มากที่สุด	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R ²)	สมการความสัมพันธ์
a1b1L10	(1k)	9.20E-09	4.20E-07	0.9980	y = 7E-08x
	(10K)	6.80E-09	1.34E-07	0.9990	y = 2E-08x
a1b1L10 no sub	(1k)	5.00E-08	1.73E-06	0.9780	y = 2E-07x
	(10K)	1.12E-08	1.30E-07	0.9832	y = 2E-08x



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อย่างมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L10 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

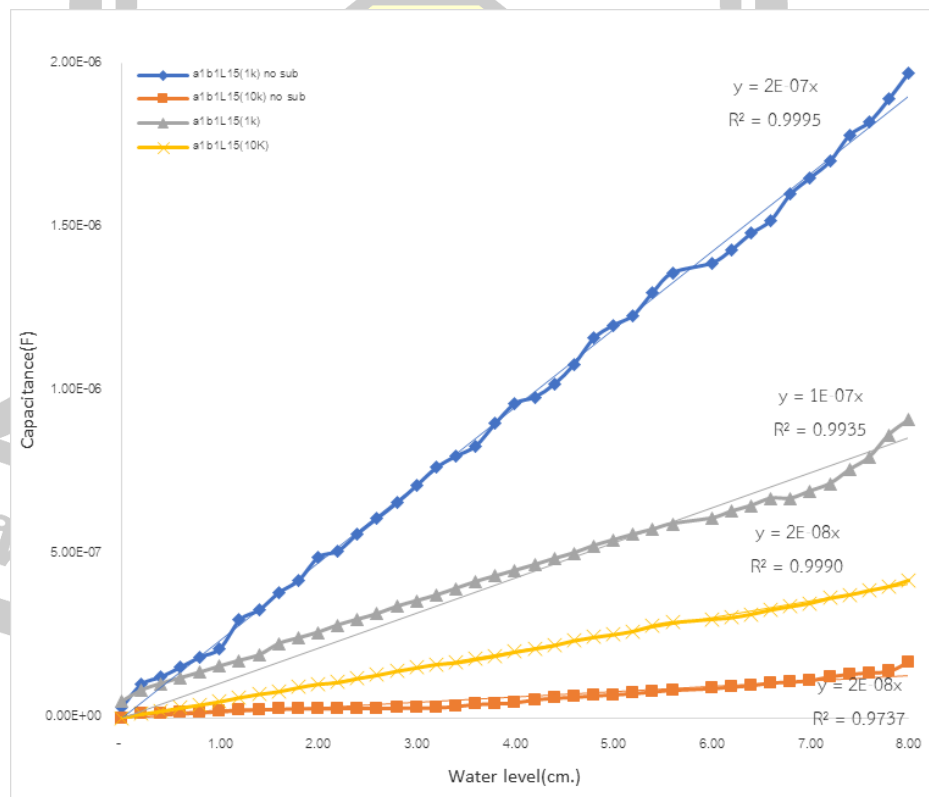
ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุโดย วัดจากเครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรอง และแบบไม่มีฐานรองโดยใช้ตัวรับรู้อย่างที่ 1 (a=1mm,b=1mm ,L=10mm) ดังตารางที่ 7 และภาพที่ 41 จะพบว่า ค่าการเก็บประจุตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้ สูงกว่าค่าการเก็บประจุตัวรับรู้อย่างมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 1kHz โดยเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรองมีค่ามากกว่า คือ $Y = 2 \times 10^{-7} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²) อยู่ที่ 0.9780 เส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อย่างไม่มีฐานรอง คือ $Y = 7 \times 10^{-8} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²) อยู่ที่ 0.9980 ค่าการเก็บประจุตัว

รับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้ น้อยกว่าการเก็บประจุตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 10kHz โดยเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรอง มีค่าน้อยกว่า คือ $Y = 2 \times 10^{-8} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9832 เส้นแนวโน้มของตัวรับรู้อยู่แบบไม่มีฐานรอง คือ $Y = 2 \times 10^{-8} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9990

- การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L15 ได้ค่าการเปรียบเทียบตามตาราง 8 และภาพที่ 42

ตารางที่ 7 ตารางเปรียบเทียบนำค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองแบบ a1b1L15

ชนิดตัวรับรู้อยู่	ความถี่	ต่ำสุด	มากที่สุด	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)	สมการความสัมพันธ์
a1b1L15	(1k)	8.36E-08	9.10E-07	0.9980	$y = 7E-08x$
	(10K)	1.20E-08	4.20E-07	0.9990	$y = 2E-08x$
a1b1L15 no sub	(1k)	1.02E-07	1.97E-06	0.9780	$y = 2E-07x$
	(10K)	1.20E-08	1.70E-07	0.9832	$y = 2E-08x$



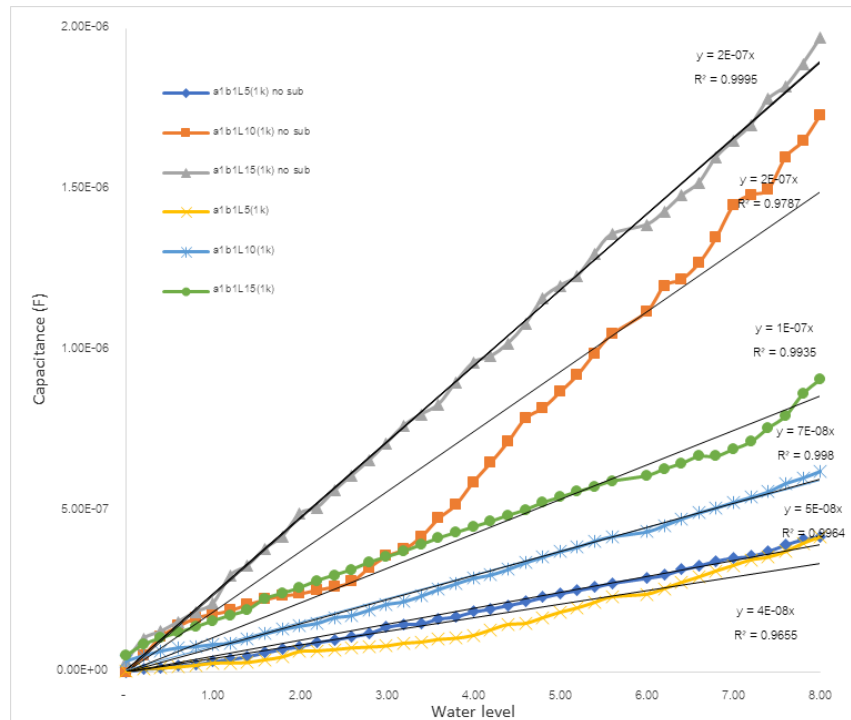
ภาพที่ 42 เปรียบเทียบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้อยู่แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง แบบ a1b1L10 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz และ 10 kHz

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุโดย วัดจากเครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรอง และแบบไม่มีฐานรองโดยใช้ตัวรับรู้ แบบที่ 1 ($a=1\text{mm}, b=1\text{mm}, L=15\text{mm}$) ดังตารางที่ 8 และภาพที่ 42 จะพบว่า ค่าการเก็บประจุตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้ สูงกว่าค่าการเก็บประจุตัวรับรู้แบบมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 1kHz โดยเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรองมีค่ามากกว่า คือ $Y = 2 \times 10^{-7} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9995 เส้นแนวโน้มของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง คือ $Y = 1 \times 10^{-7} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9935 ค่าการเก็บประจุตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้ น้อยกว่าการเก็บประจุตัวรับรู้แบบมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 10kHz โดยเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง มีค่าน้อยกว่า คือ $Y = 2 \times 10^{-8} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9737 ความเส้นแนวโน้มของตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรอง คือ $Y = 2 \times 10^{-8} X$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9990

4.5 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองโดย วัดจากเครื่อง LCR Meter ที่ความถี่ 1 kHz และ 10 kHz ได้ผลการทดลองดังนี้

- ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้แบบมีฐานรอง a1b1L5 , ตัวรับรู้แบบมีฐานรอง a1b1L10, ตัวรับรู้แบบมีฐานรอง a1b1L15, ตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L5 , ตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L10 และตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L15 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 kHz ผลที่ได้จากการวัดค่าดังภาพที่ 43

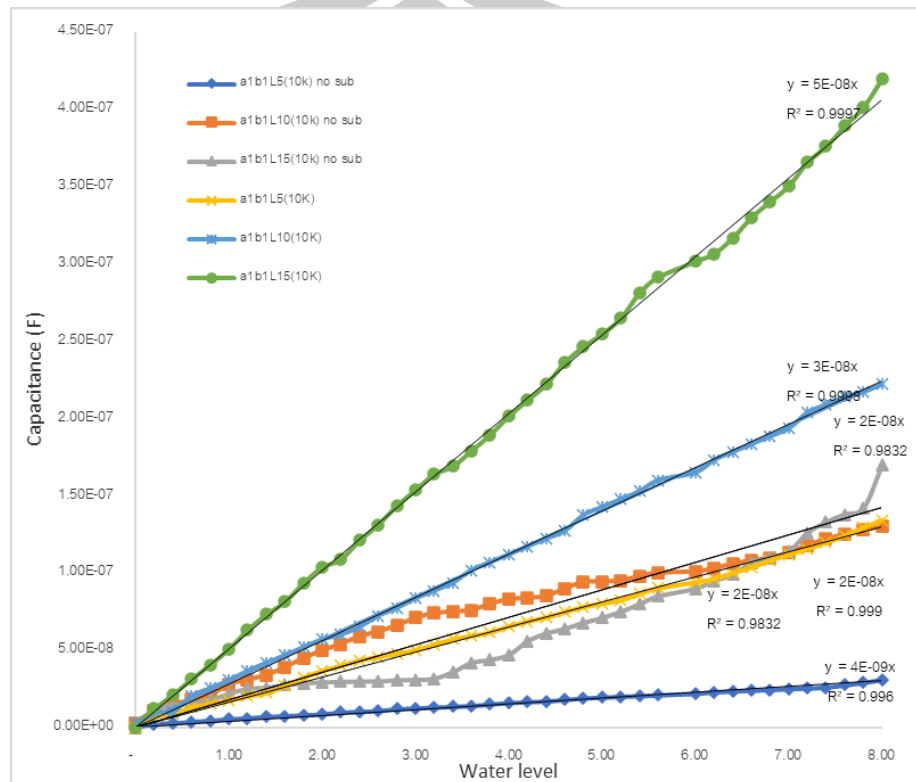


ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้อแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง ที่ความถี่ 1 kHz

จากภาพที่ 43 พบว่า การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้อที่ความถี่ 1 kHz ตัวรับรู้อไม่มีฐานรอง a1b1L15 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 1.97 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 0.2 ไมโครฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9995 ลำดับถัดมาคือ ตัวรับรู้อไม่มีฐานรอง a1b1L10 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 1.73 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 0.2 ไมโครฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9787 ลำดับถัดมาคือตัวรับรู้อมีฐานรอง a1b1L15 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.91 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 0.1 ไมโครฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9787 ลำดับถัดมาคือตัวรับรู้อมีฐานรอง a1b1L10 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.42 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 70 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9980 ลำดับถัดมาคือตัวรับรู้อไม่มีฐานรอง a1b1L5 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.42 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 50 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9964 และลำดับสุดท้ายคือ ตัวรับรู้อมีฐานรอง a1b1L5 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.42 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 40 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9655 ตามลำดับ

- ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้อแบบมีฐานรอง a1b1L5 , ตัวรับรู้อแบบมีฐานรอง a1b1L10,ตัวรับรู้อแบบมีฐานรอง a1b1L15,ตัวรับรู้อไม่มีฐานรอง a1b1L5 ,ตัว

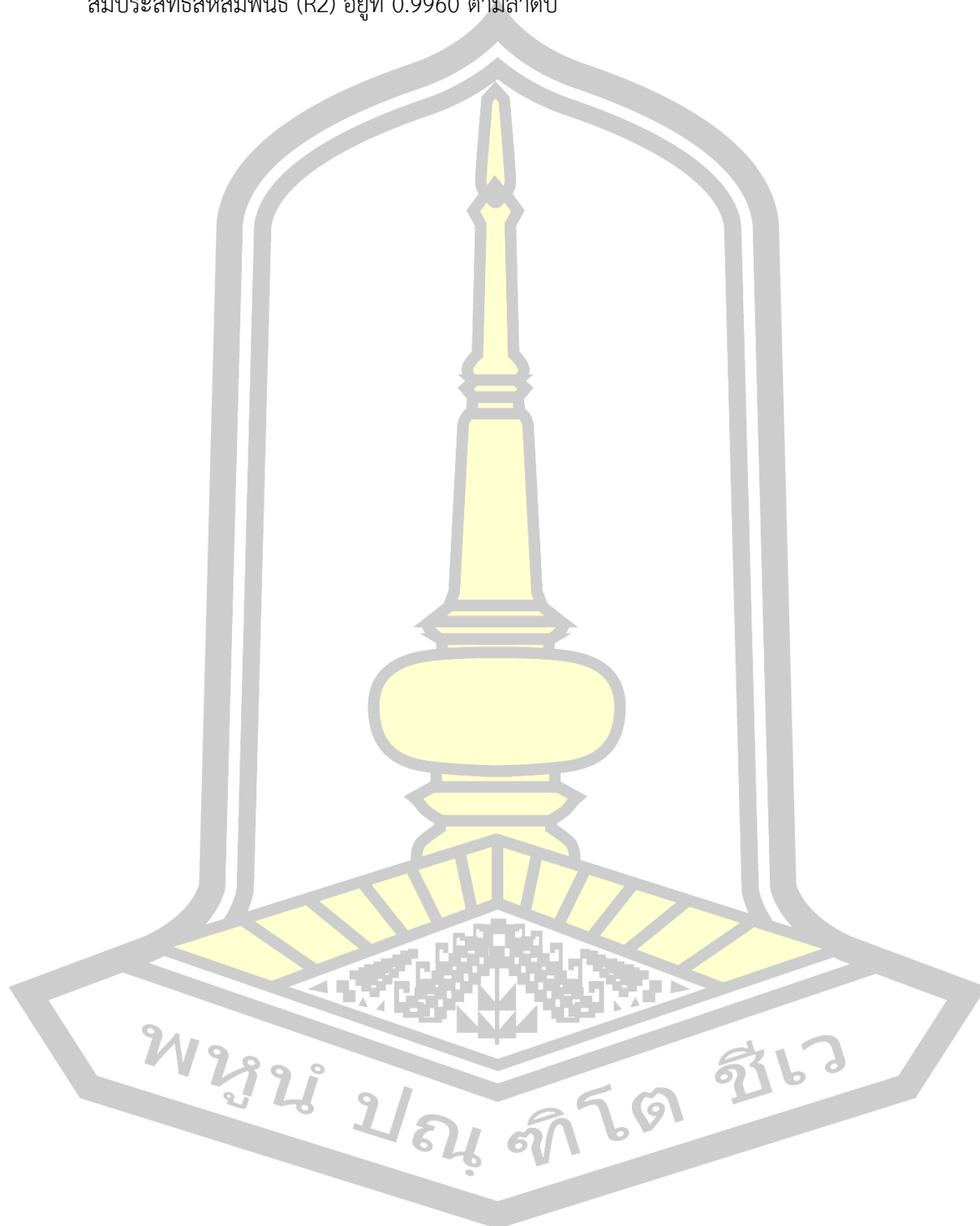
รับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L10 และตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L15 ความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 10 kHz ผลที่ได้จากการวัดค่าดังภาพที่ 50



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง ที่ความถี่ 10 kHz

จากภาพที่ 44 พบว่าการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ที่ความถี่ 10 kHz ตัวรับรู้มีฐานรอง a1b1L15 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.42 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 50 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9997 ลำดับถัดมาคือ ตัวรับรู้มีฐานรอง a1b1L10 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.22 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 30 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9990 ลำดับถัดมาคือตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L15 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.17 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 20 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9832 ลำดับถัดมาคือตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L10 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.17 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 20 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9832 ลำดับถัดมาคือตัวรับรู้มีฐานรอง a1b1L5 มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดที่ 0.12 ไมโครฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 20 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9990 และลำดับสุดท้ายคือ ตัวรับรู้ไม่มีฐานรอง a1b1L5 มีค่า

การเก็บประจุมากที่สุดที่ 31.00 นาโนฟารัด มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มเท่ากับ 4 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R2) อยู่ที่ 0.9960 ตามลำดับ



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาวัดค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิทัล 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง โดยใช้เครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ Keysight รุ่น E4980A ทำการเก็บข้อมูลแบบมีฐานรอง 3 ขนาด และแบบไม่มีฐานรอง 3 ขนาด คือความหนาของซีและระยะห่างระหว่างซี คือ 1 มิลลิเมตร ความยาวของซี แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร โดยแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุเริ่มต้นที่ 0 มิลลิเมตรไปจนถึง 80 มิลลิเมตรจำนวนย่านวัดละ 5 มิลลิเมตร 20 ค่า โดยทำการวัดค่าที่ 2 ความถี่ คือ 1 kHz และ 10 kHz ทำการทดสอบแต่ละย่านวัดซ้ำกันจุดละ 3 ครั้ง และนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ หาค่าทางสถิติ ค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวัดค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิทัล 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง สรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างทั้ง 6 แบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าการเก็บประจุที่มากที่สุดที่วัดได้ คือตัวรับรู้ 2 ข้างแบบไม่มีฐานรอง แบบที่ 3 ($a=1\text{mm}, b=1\text{mm}, L=15\text{mm}$) ที่วัดค่าได้ 0.32 - 1.97 ไมโครฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9995 โดยใช้ความถี่ในการวัดที่ 1 kHz

5.1.2 การวิเคราะห์ค่าเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง พบว่าค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิทัล 2 ข้างแบบไม่มีฐานรอง จะมีค่าการเก็บประจุมากกว่าแบบมีฐานรอง ที่ความถี่ 1 kHz ค่าการเก็บประจุตัวรับรู้ 2 ข้าง แบบไม่มีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดได้น้อยกว่าการเก็บประจุตัวรับรู้ 2 ข้าง แบบมีฐานรองในช่วงการวัดที่ความถี่ 10kHz ในการทดสอบตัวรับรู้ทั้ง 3 แบบ

5.1.3 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง พบว่า

1) การทดสอบตัวรับรู้ 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองกับค่าเก็บประจุ พบว่าค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้าง ทั้งแบบมีฐานและไม่มีฐาน มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ตัวรับรู้ 2 ข้างแบบไม่มีฐานรอง มีค่าการเก็บประจุที่สูงกว่า แบบมีฐานรองเมื่อระดับน้ำเท่ากัน

2) การทดสอบค่าเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้าง แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองกับความถี่ที่ใช้ในการวัด พบว่า ความถี่ในการวัดจะส่งผลต่อตัวรับรู้ 2 ข้าง แบบไม่มีฐานรองมากกว่าแบบมีฐานรอง โดยที่ความถี่ในการวัด 1 kHz จะได้ค่าการวัดที่สูงกว่า 10kHz

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

5.2.1 การศึกษาการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองเมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้น ค่าไดอิเล็กตริกบริเวณรอบตัวรับรู้มีการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสอดคล้องกับ สราวุฒิ บุญเกิดรัมย์(2559) [20] [23] ที่นำเสนอตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิเจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง เพื่อวัดค่าระดับน้ำ และเมื่อนำไปวัดค่าระดับน้ำพบว่า ค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ จักรพันธ์ ออบมา(2565) [22] ที่นำเสนอตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง พบว่า แบบไม่มีฐานรองมีระดับน้ำส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ

5.2.2 การศึกษาการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ 2 ข้างแบบมีฐานรองและไม่มีฐานรองเมื่อใช้ความถี่ในการวัดที่ต่างกัน เนื่องจากตัวรับรู้แบบไม่มีฐานรองมีพื้นที่หน้าสัมผัสกับน้ำมากกว่าส่งผลให้ความถี่มีผลต่อการวัดค่าการเก็บประจุมากกว่าแบบมีฐานรองสอดคล้องกับ จักรพันธ์ ออบมา(2565) [22] ที่นำเสนอตัวรับรู้แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง พบว่า แบบไม่มีฐานรองมีระดับน้ำส่งผลต่อค่าการเก็บประจุมากกว่าแบบไม่มีฐานรอง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

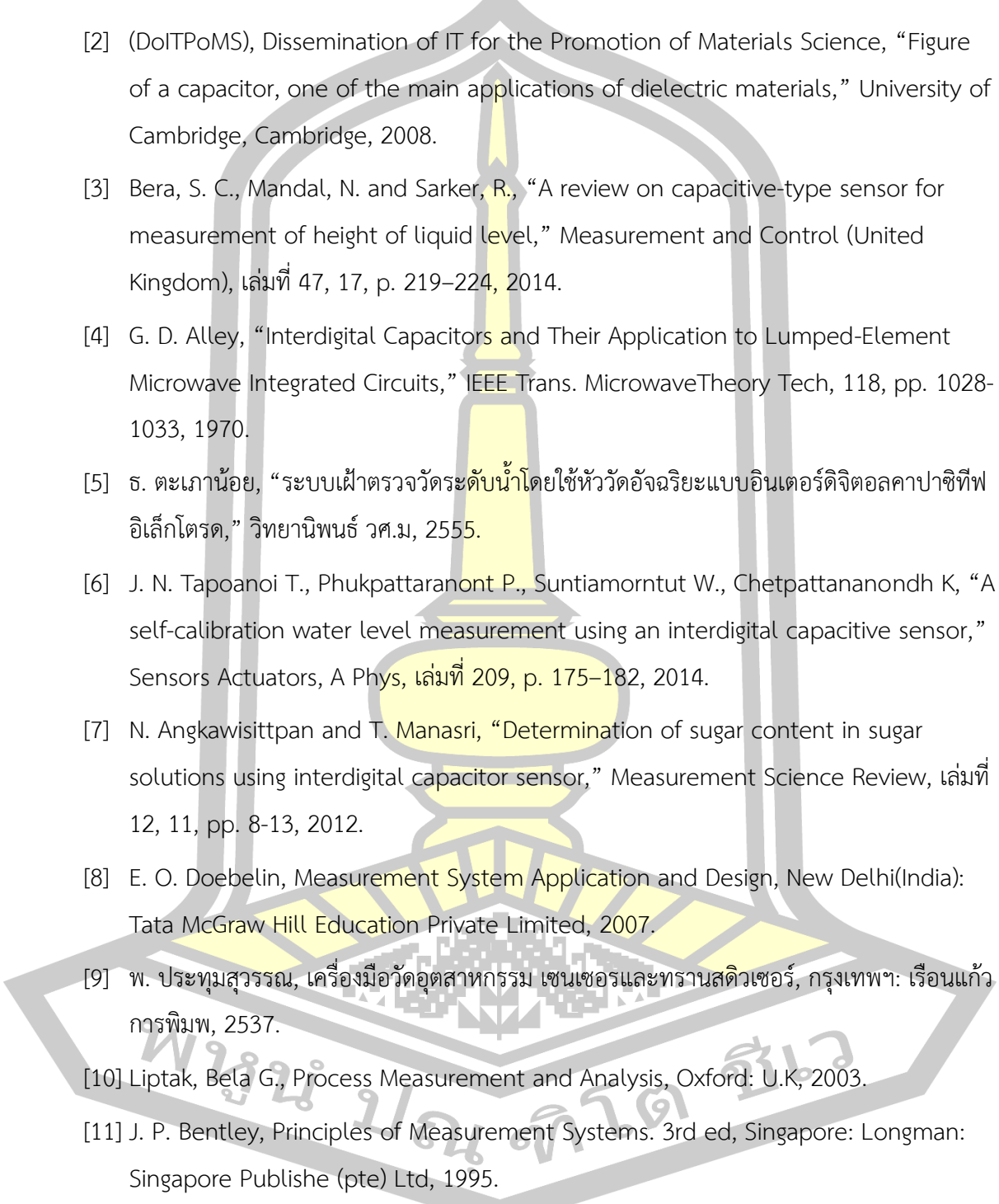
- 1) นำผลของการทดสอบเพื่อออกแบบชุดตรวจวัดระดับน้ำเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์
- 2) นำผลของการทดสอบเพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาตัวรับรู้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้น

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

ควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำไปใช้กับของเหลวรูปแบบอื่น เช่น น้ำมัน

บรรณานุกรม

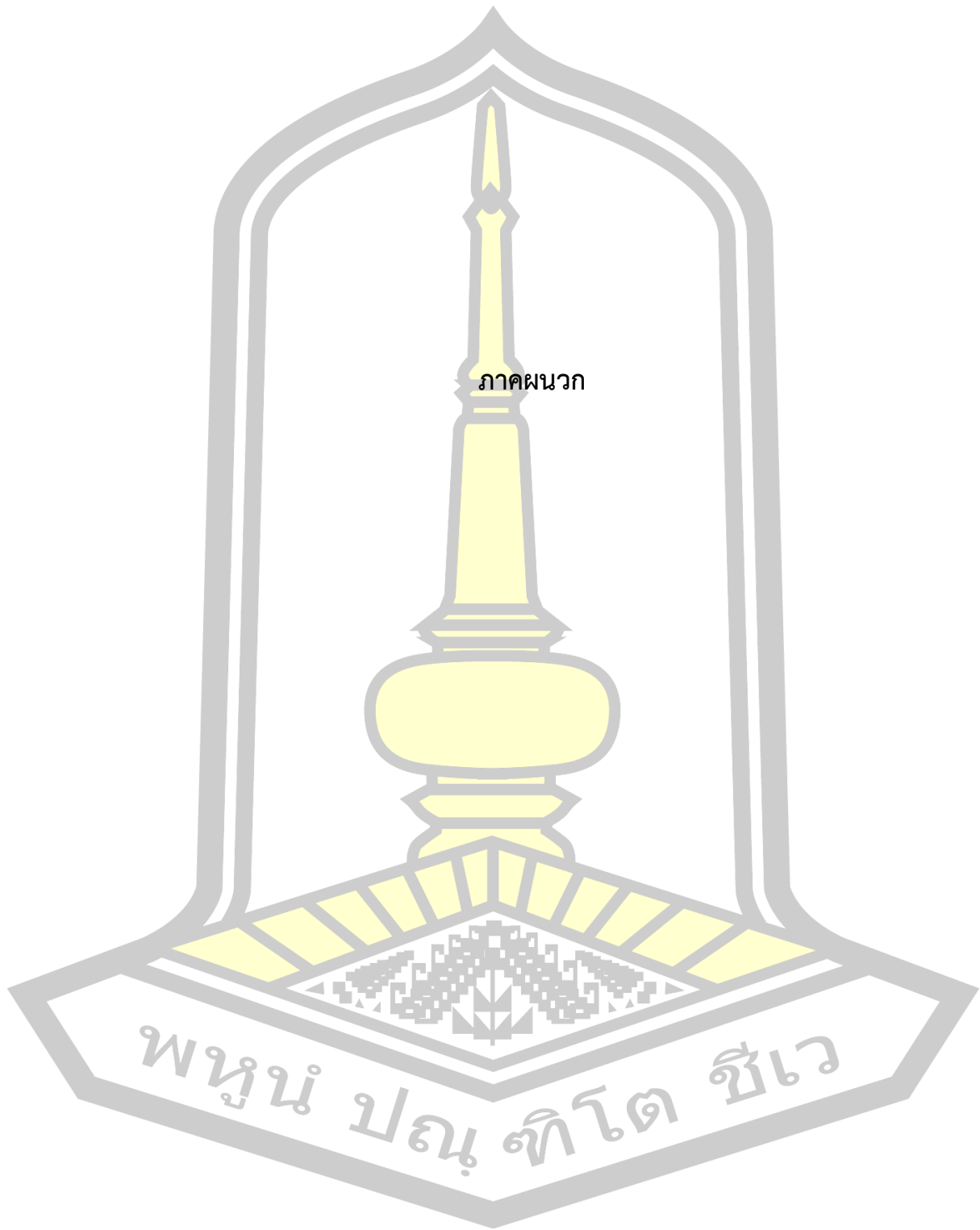


- 
- [1] Alexander, Charles K. and Sadiku, Matthew N. O., Fundamentals of Electric Circuits: Fifth Edition, Prentice Hall, 2012.
- [2] (DoITPoMS), Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science, “Figure of a capacitor, one of the main applications of dielectric materials,” University of Cambridge, Cambridge, 2008.
- [3] Bera, S. C., Mandal, N. and Sarker, R., “A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level,” Measurement and Control (United Kingdom), เล่มที่ 47, 17, p. 219–224, 2014.
- [4] G. D. Alley, “Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-Element Microwave Integrated Circuits,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 118, pp. 1028-1033, 1970.
- [5] ช. ตะเกาน้อย, “ระบบฝ้าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอีเล็กโตรด,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม, 2555.
- [6] J. N. Tapoanoi T., Phukpattaranont P., Suntiamorntut W., Chetpattananondh K, “A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor,” Sensors Actuators, A Phys, เล่มที่ 209, p. 175–182, 2014.
- [7] N. Angkawisitpan and T. Manasri, “Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor,” Measurement Science Review, เล่มที่ 12, 11, pp. 8-13, 2012.
- [8] E. O. Doebelin, Measurement System Application and Design, New Delhi(India): Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2007.
- [9] พ. ประทุมสุวรรณ, เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์, กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์, 2537.
- [10] Liptak, Bela G., Process Measurement and Analysis, Oxford: U.K, 2003.
- [11] J. P. Bentley, Principles of Measurement Systems. 3rd ed, Singapore: Longman: Singapore Publishe (pte) Ltd, 1995.
- [12] Kyung-RakSohn and Joon-Hwan Shim, “Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever,” Sensors and Actuators A: Physical,, เล่มที่ 152, pp. 248-251, 2009.

- [13] Reverter, Ferran, Li, Xiujun and Meijer, Gerard C.M., “Liquid-level Measurement System Based on are Mote Grounded Capacitive Sensor,” *Sensors and Sensors and*, เล่มที่ A, p. 138, 2007.
- [14] Bera, Satish Chandra, Ray, Jayanta Kumar and Chattopadhyay, Subrata. “A Low-Cost Noncontact Capacitance-Type Level Transducer for a Conducting Liquid,” *IEEE Transactions on Transactions on Instrumentation and Measurement*, เล่มที่ 55, %13, 2006.
- [15] H. Canbolat, “A Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, เล่มที่ 10, p. 58, 2009.
- [16] ศุภกร กตาทิการกุล และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์, “การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก,” *วิศวกรรมสาร มข*, เล่มที่ 38, %12, p. 179–186, 2554.
- [17] M. A. Md Nazmul Alam and Rashad H Bhuiyan and Roger A Dougal, “Concrete moisture content measurement using interdigitated near-field sensors,” *Sensors Journal, IEEE*, เล่มที่ 10, %17, pp. 1243-1248, 2010.
- [18] J. N. Tapoanoi T., Phukpattaranont P., Suntiarnontut W., Chetpattananondh K, “Interdigital electrode water level sensor,” *KKU Eng. J.*, เล่มที่ 39, %13, p. 249–256, 2012.
- [19] ทรงกรต พิมพิศาล, การประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับการประมาณค่าปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำมันดิบ,” *วิทยานิพนธ์ ปร.ด., มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2559..
- [20] สราวุฒิ บุญเกิดรัมย์., การออกแบบและพัฒนาระดับของเหลวแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ, *มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2559.
- [21] Pavel Kulha, “Screen printed and laminated electrodes for low-cost capacitive level measurement systems,” *Journal of Electrical Engineering*, เล่มที่ 69, %12, pp. 177-182, 2018.
- [22] Jagraphon Obma and Worawat Sa-Ngiamvibool, “The Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor,” *Prz. Elektrotechniczny*, เล่มที่ 96, p. 34–37, 2020.
- [23] S. Boonkirdram and W. Sa-Ngiamvibool, “A Novel Planar Interdigital Capacitor Level Sensor.,” *Prz. Elektrotechniczny*, เล่มที่ 91, %18, p. 91–95, 2015.

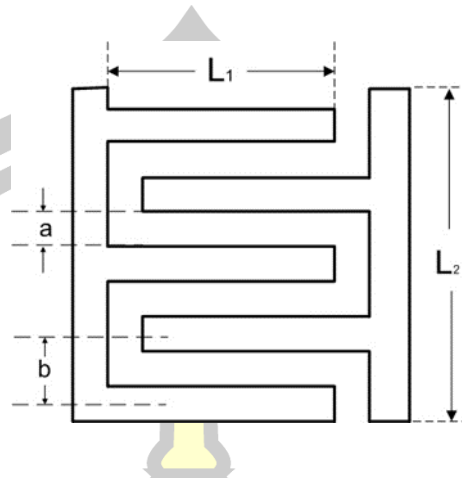
- [24] สิทธิศักดิ์ เรืองฤทธิ์ นิวัตร อังคศิษุพันธ์ และวรวัดน์ เสี่ยงมิบูล, “การตรวจสอบการปนน้ำใน น้ำนมดิบโดยอิเล็กทรอนิกส์หิว,” วารสารวิชาการและการวิจัยมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคล พระนคร, 1 ฉบับพิเศษ, p. 89–95, 2556..
- [25] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์, กรุงเทพฯ: ที.เอส.บี. โปรดักส์, 2548.
- [26] กิตติวุฒิ จินนะบุตร, เครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลอีสาน, 2548..
- [27] สมนึก บุญพาไสว, “ตัวรับรู้และทรานสดิวเซอร์,” 2549. [ออนไลน์]. Available: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/4/PDF-science/Sensor-transducer.pdf%0A..>







รูปแบบตัวรับรู้ระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิฟิทัคคาปาซิเตอร์แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง



a คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ

b คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

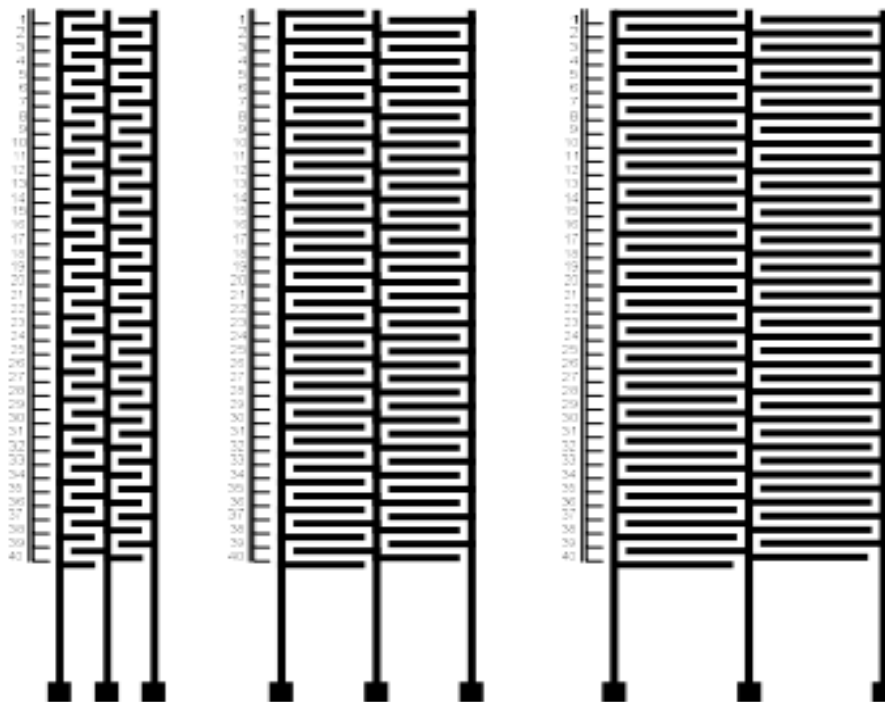
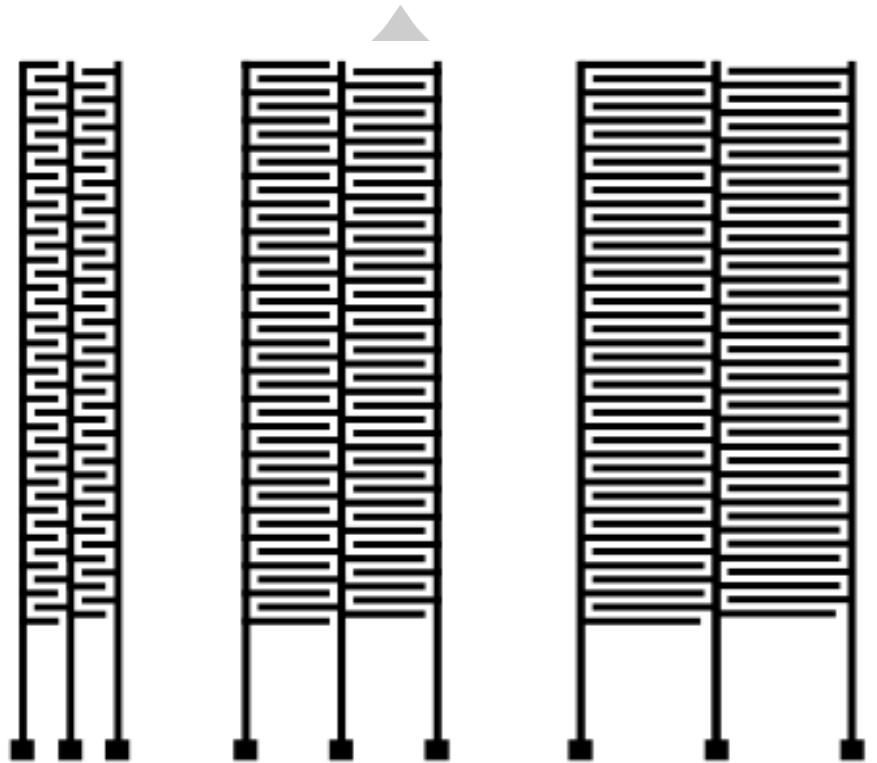
L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

N คือ จำนวนแผ่นตัวนำ

IDC model	b (ม.ม.)	a (ม.ม.)	L (ม.ม.)
1	1	2	5
2	1	2	10
3	1	2	15

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตัวรับรูระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แบบมีฐานและไม่มีฐานที่ใช้ศึกษา





ภาคผนวก ข

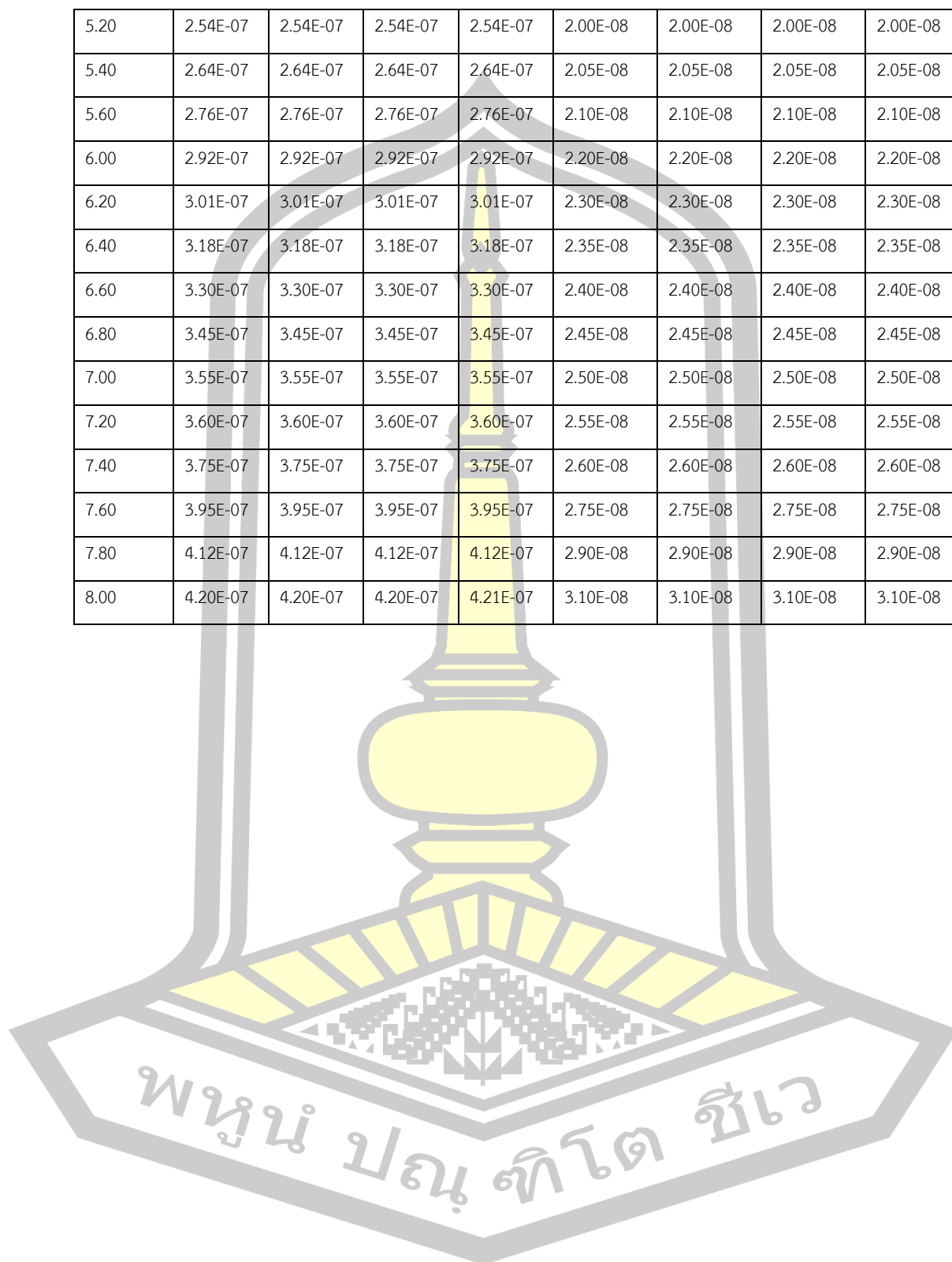
ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดัชนีแบบอินเทอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐานและไม่มีฐาน

พหุ ประจักษ์ วิทยา

ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดัชนีแบบอินเทอร์ดิทลคาปาซิเตอร์แบบมีฐาน a1b1L5

	a1b1L5							
	1	2	3	AVG	1	2	3	AVG
	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(10 K)	a1b1L5(10 K)	a1b1L5(10 K)	a1b1L5(10 K)
-	6.20E-11	6.22E-11	6.21E-11	6.20E-11	3.90E-11	3.90E-11	3.90E-11	4.10E-11
0.20	9.25E-09	9.20E-09	9.24E-09	9.10E-09	2.40E-09	2.40E-09	2.40E-09	2.40E-09
0.40	1.17E-08	1.17E-08	1.17E-08	1.17E-08	2.80E-09	2.80E-09	2.80E-09	2.80E-09
0.60	1.95E-08	1.95E-08	1.95E-08	1.95E-08	3.80E-09	3.80E-09	3.80E-09	3.80E-09
0.80	2.35E-08	2.35E-08	2.35E-08	2.35E-08	4.50E-09	4.50E-09	4.50E-09	4.50E-09
1.00	3.20E-08	3.20E-08	3.20E-08	3.20E-08	5.50E-09	5.50E-09	5.50E-09	5.50E-09
1.20	3.97E-08	3.97E-08	3.97E-08	3.97E-08	6.10E-09	6.10E-09	6.10E-09	6.10E-09
1.40	4.80E-08	4.80E-08	4.80E-08	4.80E-08	7.00E-09	7.00E-09	7.00E-09	7.00E-09
1.60	6.02E-08	6.02E-08	6.02E-08	6.02E-08	7.50E-09	7.50E-09	7.50E-09	7.50E-09
1.80	7.10E-08	7.10E-08	7.10E-08	7.10E-08	8.00E-09	8.00E-09	8.00E-09	8.00E-09
2.00	7.90E-08	7.90E-08	7.90E-08	7.90E-08	8.60E-09	8.60E-09	8.60E-09	8.60E-09
2.20	9.20E-08	9.20E-08	9.20E-08	9.20E-08	9.80E-09	9.80E-09	9.80E-09	9.80E-09
2.40	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07	1.02E-08	1.02E-08	1.02E-08	1.02E-08
2.60	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07	1.08E-08	1.08E-08	1.08E-08	1.08E-08
2.80	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-08	1.20E-08	1.20E-08	1.20E-08
3.00	1.39E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.25E-08	1.25E-08	1.25E-08	1.25E-08
3.20	1.48E-07	1.48E-07	1.48E-07	1.48E-07	1.30E-08	1.30E-08	1.30E-08	1.30E-08
3.40	1.50E-07	1.50E-07	1.50E-07	1.50E-07	1.35E-08	1.35E-08	1.35E-08	1.35E-08
3.60	1.65E-07	1.65E-07	1.65E-07	1.65E-07	1.40E-08	1.40E-08	1.40E-08	1.40E-08
3.80	1.72E-07	1.72E-07	1.72E-07	1.72E-07	1.50E-08	1.50E-08	1.50E-08	1.50E-08
4.00	1.87E-07	1.87E-07	1.87E-07	1.87E-07	1.60E-08	1.60E-08	1.60E-08	1.60E-08
4.20	1.96E-07	1.96E-07	1.96E-07	1.96E-07	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08
4.40	2.07E-07	2.07E-07	2.07E-07	2.07E-07	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08
4.60	2.18E-07	2.18E-07	2.18E-07	2.18E-07	1.80E-08	1.80E-08	1.80E-08	1.80E-08
4.80	2.32E-07	2.32E-07	2.32E-07	2.32E-07	1.90E-08	1.90E-08	1.90E-08	1.90E-08
5.00	2.44E-07	2.44E-07	2.44E-07	2.44E-07	1.95E-08	1.95E-08	1.95E-08	1.95E-08

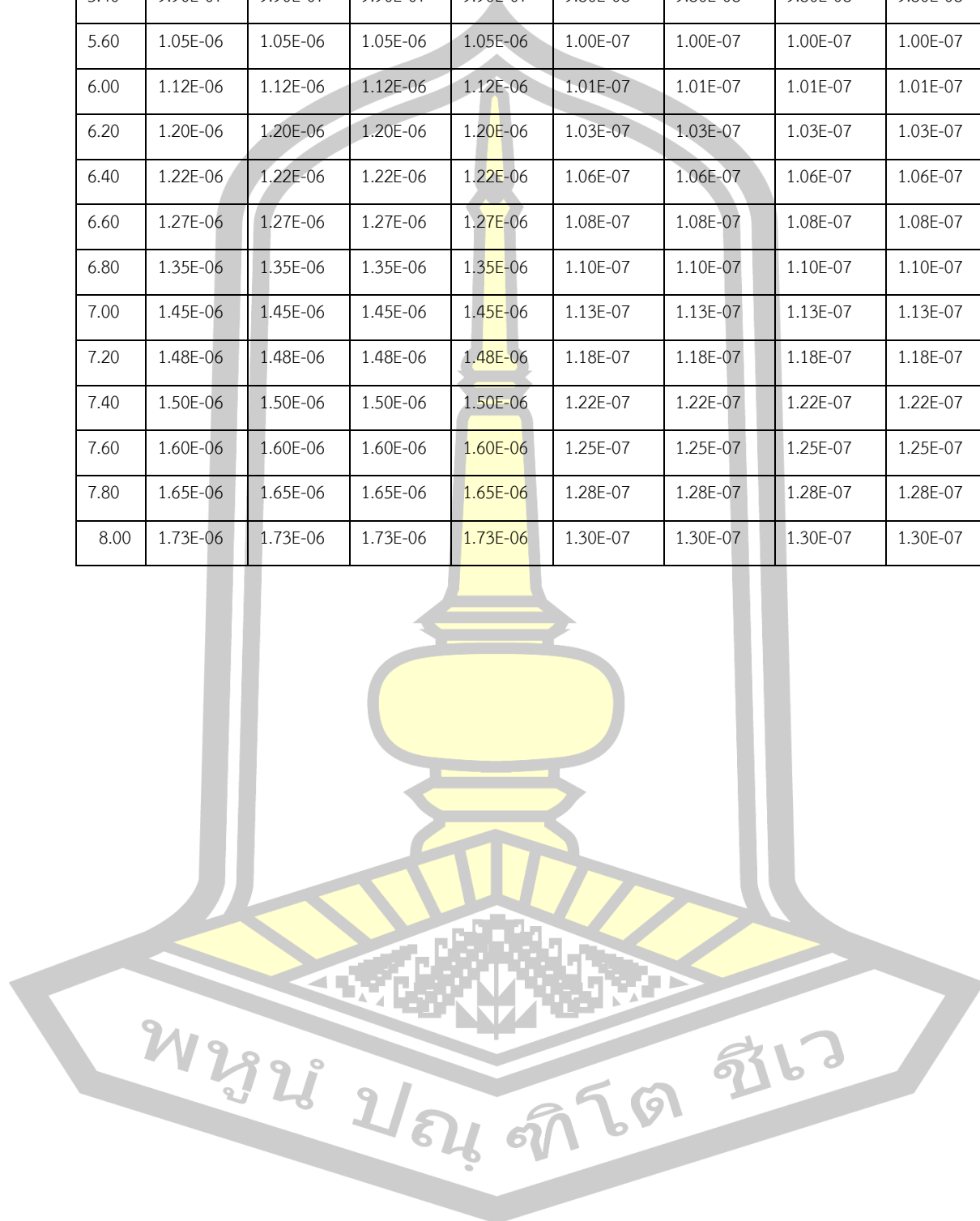
5.20	2.54E-07	2.54E-07	2.54E-07	2.54E-07	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08
5.40	2.64E-07	2.64E-07	2.64E-07	2.64E-07	2.05E-08	2.05E-08	2.05E-08	2.05E-08
5.60	2.76E-07	2.76E-07	2.76E-07	2.76E-07	2.10E-08	2.10E-08	2.10E-08	2.10E-08
6.00	2.92E-07	2.92E-07	2.92E-07	2.92E-07	2.20E-08	2.20E-08	2.20E-08	2.20E-08
6.20	3.01E-07	3.01E-07	3.01E-07	3.01E-07	2.30E-08	2.30E-08	2.30E-08	2.30E-08
6.40	3.18E-07	3.18E-07	3.18E-07	3.18E-07	2.35E-08	2.35E-08	2.35E-08	2.35E-08
6.60	3.30E-07	3.30E-07	3.30E-07	3.30E-07	2.40E-08	2.40E-08	2.40E-08	2.40E-08
6.80	3.45E-07	3.45E-07	3.45E-07	3.45E-07	2.45E-08	2.45E-08	2.45E-08	2.45E-08
7.00	3.55E-07	3.55E-07	3.55E-07	3.55E-07	2.50E-08	2.50E-08	2.50E-08	2.50E-08
7.20	3.60E-07	3.60E-07	3.60E-07	3.60E-07	2.55E-08	2.55E-08	2.55E-08	2.55E-08
7.40	3.75E-07	3.75E-07	3.75E-07	3.75E-07	2.60E-08	2.60E-08	2.60E-08	2.60E-08
7.60	3.95E-07	3.95E-07	3.95E-07	3.95E-07	2.75E-08	2.75E-08	2.75E-08	2.75E-08
7.80	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
8.00	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.21E-07	3.10E-08	3.10E-08	3.10E-08	3.10E-08



ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดัชนีแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบมีฐาน a1b1L10

	a1b1L10							
	1	2	3	AVG	1	2	3	AVG
	a1b1L10(1k)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(10k)	a1b1L10(10k)	a1b1L10(10k)	a1b1L10(10k)
-	1.64E-10	1.64E-10	1.64E-10	1.64E-10	2.70E-09	2.70E-09	2.70E-09	2.70E-09
0.20	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-08	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08
0.40	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07	1.48E-08	1.48E-08	1.48E-08	1.48E-08
0.60	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.80E-08	1.80E-08	1.80E-08	1.80E-08
0.80	1.68E-07	1.68E-07	1.68E-07	1.68E-07	2.10E-08	2.10E-08	2.10E-08	2.10E-08
1.00	1.80E-07	1.80E-07	1.80E-07	1.80E-07	2.80E-08	2.80E-08	2.80E-08	2.80E-08
1.20	1.91E-07	1.91E-07	1.91E-07	1.91E-07	3.10E-08	3.10E-08	3.10E-08	3.10E-08
1.40	2.10E-07	2.10E-07	2.10E-07	2.10E-07	3.40E-08	3.40E-08	3.40E-08	3.40E-08
1.60	2.25E-07	2.25E-07	2.25E-07	2.25E-07	3.90E-08	3.90E-08	3.90E-08	3.90E-08
1.80	2.37E-07	2.37E-07	2.37E-07	2.37E-07	4.50E-08	4.50E-08	4.50E-08	4.50E-08
2.00	2.43E-07	2.43E-07	2.43E-07	2.43E-07	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-08
2.20	2.55E-07	2.55E-07	2.55E-07	2.55E-07	5.40E-08	5.40E-08	5.40E-08	5.40E-08
2.40	2.65E-07	2.65E-07	2.65E-07	2.65E-07	5.90E-08	5.90E-08	5.90E-08	5.90E-08
2.60	2.80E-07	2.80E-07	2.80E-07	2.80E-07	6.20E-08	6.20E-08	6.20E-08	6.20E-08
2.80	3.24E-07	3.24E-07	3.24E-07	3.24E-07	6.60E-08	6.60E-08	6.60E-08	6.60E-08
3.00	3.60E-07	3.60E-07	3.60E-07	3.60E-07	7.10E-08	7.10E-08	7.10E-08	7.10E-08
3.20	3.81E-07	3.81E-07	3.81E-07	3.81E-07	7.40E-08	7.40E-08	7.40E-08	7.40E-08
3.40	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	7.50E-08	7.50E-08	7.50E-08	7.50E-08
3.60	4.77E-07	4.77E-07	4.77E-07	4.77E-07	7.60E-08	7.60E-08	7.60E-08	7.60E-08
3.80	5.20E-07	5.20E-07	5.20E-07	5.20E-07	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08
4.00	5.90E-07	5.90E-07	5.90E-07	5.90E-07	8.30E-08	8.30E-08	8.30E-08	8.30E-08
4.20	6.50E-07	6.50E-07	6.50E-07	6.50E-07	8.40E-08	8.40E-08	8.40E-08	8.40E-08
4.40	7.15E-07	7.15E-07	7.15E-07	7.15E-07	8.50E-08	8.50E-08	8.50E-08	8.50E-08
4.60	7.88E-07	7.88E-07	7.88E-07	7.88E-07	9.00E-08	9.00E-08	9.00E-08	9.00E-08
4.80	8.20E-07	8.20E-07	8.20E-07	8.20E-07	9.40E-08	9.40E-08	9.40E-08	9.40E-08
5.00	8.70E-07	8.70E-07	8.70E-07	8.70E-07	9.45E-08	9.45E-08	9.45E-08	9.45E-08

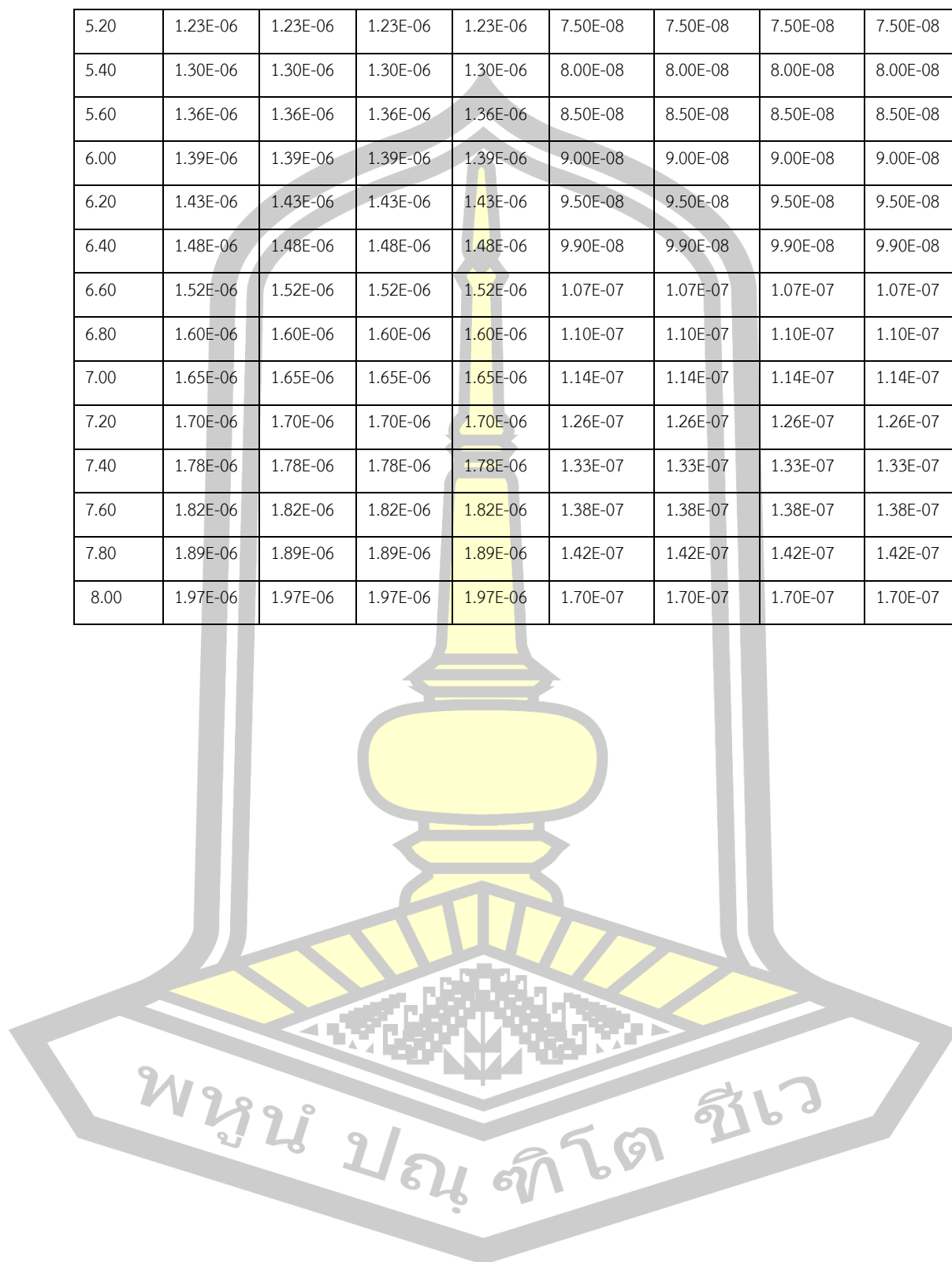
5.20	9.23E-07	9.23E-07	9.23E-07	9.23E-07	9.50E-08	9.50E-08	9.50E-08	9.50E-08
5.40	9.90E-07	9.90E-07	9.90E-07	9.90E-07	9.80E-08	9.80E-08	9.80E-08	9.80E-08
5.60	1.05E-06	1.05E-06	1.05E-06	1.05E-06	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07
6.00	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.01E-07	1.01E-07	1.01E-07	1.01E-07
6.20	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	1.03E-07	1.03E-07	1.03E-07	1.03E-07
6.40	1.22E-06	1.22E-06	1.22E-06	1.22E-06	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
6.60	1.27E-06	1.27E-06	1.27E-06	1.27E-06	1.08E-07	1.08E-07	1.08E-07	1.08E-07
6.80	1.35E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07
7.00	1.45E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.13E-07	1.13E-07	1.13E-07	1.13E-07
7.20	1.48E-06	1.48E-06	1.48E-06	1.48E-06	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07
7.40	1.50E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.22E-07	1.22E-07	1.22E-07	1.22E-07
7.60	1.60E-06	1.60E-06	1.60E-06	1.60E-06	1.25E-07	1.25E-07	1.25E-07	1.25E-07
7.80	1.65E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.28E-07	1.28E-07	1.28E-07	1.28E-07
8.00	1.73E-06	1.73E-06	1.73E-06	1.73E-06	1.30E-07	1.30E-07	1.30E-07	1.30E-07



ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดัชนีแบบอินเทอร์ดิทลคาปาซิเตอร์แบบมีฐาน a1b1L15

	a1b1L15							
	1	2	3	AVG	1	2	3	AVG
	a1b1L15(1k)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(10k)	a1b1L15(10k)	a1b1L15(10k)	a1b1L15(10k)
-	3.20E-08	3.20E-08	3.20E-08	3.20E-08	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10
0.20	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.20E-08	1.20E-08	1.20E-08	1.20E-08
0.40	1.25E-07	1.25E-07	1.25E-07	1.25E-07	1.43E-08	1.43E-08	1.43E-08	1.43E-08
0.60	1.55E-07	1.55E-07	1.55E-07	1.55E-07	1.60E-08	1.60E-08	1.60E-08	1.60E-08
0.80	1.86E-07	1.86E-07	1.86E-07	1.86E-07	1.80E-08	1.80E-08	1.80E-08	1.80E-08
1.00	2.12E-07	2.12E-07	2.12E-07	2.12E-07	2.20E-08	2.20E-08	2.20E-08	2.20E-08
1.20	2.99E-07	2.99E-07	2.99E-07	2.99E-07	2.53E-08	2.53E-08	2.53E-08	2.53E-08
1.40	3.30E-07	3.30E-07	3.30E-07	3.30E-07	2.60E-08	2.60E-08	2.60E-08	2.60E-08
1.60	3.83E-07	3.83E-07	3.83E-07	3.83E-07	2.76E-08	2.76E-08	2.76E-08	2.76E-08
1.80	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	2.88E-08	2.88E-08	2.88E-08	2.88E-08
2.00	4.91E-07	4.91E-07	4.91E-07	4.91E-07	2.95E-08	2.95E-08	2.95E-08	2.95E-08
2.20	5.10E-07	5.10E-07	5.10E-07	5.10E-07	2.97E-08	2.97E-08	2.97E-08	2.97E-08
2.40	5.63E-07	5.63E-07	5.63E-07	5.63E-07	3.00E-08	3.00E-08	3.00E-08	3.00E-08
2.60	6.10E-07	6.10E-07	6.10E-07	6.10E-07	3.00E-08	3.00E-08	3.00E-08	3.00E-08
2.80	6.57E-07	6.57E-07	6.57E-07	6.57E-07	3.08E-08	3.08E-08	3.08E-08	3.08E-08
3.00	7.10E-07	7.10E-07	7.10E-07	7.10E-07	3.10E-08	3.10E-08	3.10E-08	3.10E-08
3.20	7.65E-07	7.65E-07	7.65E-07	7.65E-07	3.18E-08	3.18E-08	3.18E-08	3.18E-08
3.40	8.00E-07	8.00E-07	8.00E-07	8.00E-07	3.60E-08	3.60E-08	3.60E-08	3.60E-08
3.60	8.31E-07	8.31E-07	8.31E-07	8.31E-07	4.20E-08	4.20E-08	4.20E-08	4.20E-08
3.80	9.00E-07	9.00E-07	9.00E-07	9.00E-07	4.40E-08	4.40E-08	4.40E-08	4.40E-08
4.00	9.61E-07	9.61E-07	9.61E-07	9.61E-07	4.71E-08	4.71E-08	4.71E-08	4.71E-08
4.20	9.80E-07	9.80E-07	9.80E-07	9.80E-07	5.60E-08	5.60E-08	5.60E-08	5.60E-08
4.40	1.02E-06	1.02E-06	1.02E-06	1.02E-06	6.10E-08	6.10E-08	6.10E-08	6.10E-08
4.60	1.08E-06	1.08E-06	1.08E-06	1.08E-06	6.40E-08	6.40E-08	6.40E-08	6.40E-08
4.80	1.16E-06	1.16E-06	1.16E-06	1.16E-06	6.80E-08	6.80E-08	6.80E-08	6.80E-08
5.00	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	7.10E-08	7.10E-08	7.10E-08	7.10E-08

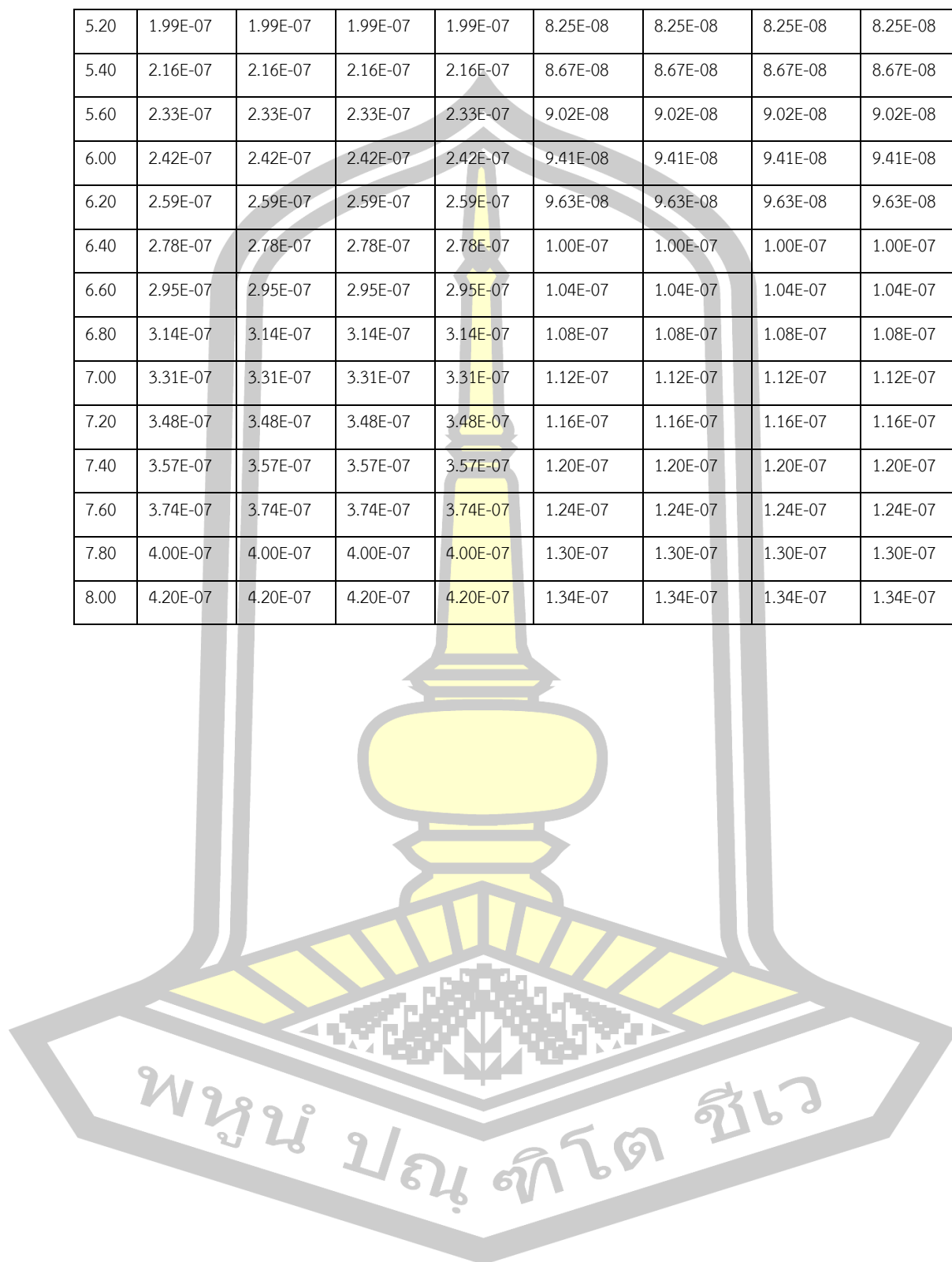
5.20	1.23E-06	1.23E-06	1.23E-06	1.23E-06	7.50E-08	7.50E-08	7.50E-08	7.50E-08
5.40	1.30E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.30E-06	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08
5.60	1.36E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.36E-06	8.50E-08	8.50E-08	8.50E-08	8.50E-08
6.00	1.39E-06	1.39E-06	1.39E-06	1.39E-06	9.00E-08	9.00E-08	9.00E-08	9.00E-08
6.20	1.43E-06	1.43E-06	1.43E-06	1.43E-06	9.50E-08	9.50E-08	9.50E-08	9.50E-08
6.40	1.48E-06	1.48E-06	1.48E-06	1.48E-06	9.90E-08	9.90E-08	9.90E-08	9.90E-08
6.60	1.52E-06	1.52E-06	1.52E-06	1.52E-06	1.07E-07	1.07E-07	1.07E-07	1.07E-07
6.80	1.60E-06	1.60E-06	1.60E-06	1.60E-06	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07	1.10E-07
7.00	1.65E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.14E-07	1.14E-07	1.14E-07	1.14E-07
7.20	1.70E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07
7.40	1.78E-06	1.78E-06	1.78E-06	1.78E-06	1.33E-07	1.33E-07	1.33E-07	1.33E-07
7.60	1.82E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07
7.80	1.89E-06	1.89E-06	1.89E-06	1.89E-06	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07
8.00	1.97E-06	1.97E-06	1.97E-06	1.97E-06	1.70E-07	1.70E-07	1.70E-07	1.70E-07



ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบไม่มีฐาน a1b1L5

	a1b1L5							
	1	2	3	AVG	1	2	3	AVG
	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(1 k)	a1b1L5(10 K)	a1b1L5(10 K)	a1b1L5(10 K)	a1b1L5(10 K)
-	1.78E-09	1.78E-09	1.78E-09	1.78E-09	3.90E-11	3.90E-11	3.90E-11	3.90E-11
0.20	9.20E-09	9.20E-09	9.20E-09	9.20E-09	6.80E-09	6.80E-09	6.80E-09	6.80E-09
0.40	1.09E-08	1.09E-08	1.09E-08	1.09E-08	9.00E-09	9.00E-09	9.00E-09	9.00E-09
0.60	1.44E-08	1.44E-08	1.44E-08	1.44E-08	1.32E-08	1.32E-08	1.32E-08	1.32E-08
0.80	1.95E-08	1.95E-08	1.95E-08	1.95E-08	1.54E-08	1.54E-08	1.54E-08	1.54E-08
1.00	2.64E-08	2.64E-08	2.64E-08	2.64E-08	1.76E-08	1.76E-08	1.76E-08	1.76E-08
1.20	2.73E-08	2.73E-08	2.73E-08	2.73E-08	2.02E-08	2.02E-08	2.02E-08	2.02E-08
1.40	2.85E-08	2.85E-08	2.85E-08	2.85E-08	2.24E-08	2.24E-08	2.24E-08	2.24E-08
1.60	3.71E-08	3.71E-08	3.71E-08	3.71E-08	2.68E-08	2.68E-08	2.68E-08	2.68E-08
1.80	4.57E-08	4.57E-08	4.57E-08	4.57E-08	3.23E-08	3.23E-08	3.23E-08	3.23E-08
2.00	6.29E-08	6.29E-08	6.29E-08	6.29E-08	3.67E-08	3.67E-08	3.67E-08	3.67E-08
2.20	6.46E-08	6.46E-08	6.46E-08	6.46E-08	4.00E-08	4.00E-08	4.00E-08	4.00E-08
2.40	6.89E-08	6.89E-08	6.89E-08	6.89E-08	4.35E-08	4.35E-08	4.35E-08	4.35E-08
2.60	7.40E-08	7.40E-08	7.40E-08	7.40E-08	4.57E-08	4.57E-08	4.57E-08	4.57E-08
2.80	7.66E-08	7.66E-08	7.66E-08	7.66E-08	4.79E-08	4.79E-08	4.79E-08	4.79E-08
3.00	8.01E-08	8.01E-08	8.01E-08	8.01E-08	5.01E-08	5.01E-08	5.01E-08	5.01E-08
3.20	8.87E-08	8.87E-08	8.87E-08	8.87E-08	5.37E-08	5.37E-08	5.37E-08	5.37E-08
3.40	9.21E-08	9.21E-08	9.21E-08	9.21E-08	5.72E-08	5.72E-08	5.72E-08	5.72E-08
3.60	1.01E-07	1.01E-07	1.01E-07	1.01E-07	5.94E-08	5.94E-08	5.94E-08	5.94E-08
3.80	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	6.16E-08	6.16E-08	6.16E-08	6.16E-08
4.00	1.13E-07	1.13E-07	1.13E-07	1.13E-07	6.55E-08	6.55E-08	6.55E-08	6.55E-08
4.20	1.30E-07	1.30E-07	1.30E-07	1.30E-07	6.86E-08	6.86E-08	6.86E-08	6.86E-08
4.40	1.47E-07	1.47E-07	1.47E-07	1.47E-07	7.13E-08	7.13E-08	7.13E-08	7.13E-08
4.60	1.51E-07	1.51E-07	1.51E-07	1.51E-07	7.48E-08	7.48E-08	7.48E-08	7.48E-08
4.80	1.68E-07	1.68E-07	1.68E-07	1.68E-07	7.81E-08	7.81E-08	7.81E-08	7.81E-08
5.00	1.85E-07	1.85E-07	1.85E-07	1.85E-07	8.03E-08	8.03E-08	8.03E-08	8.03E-08

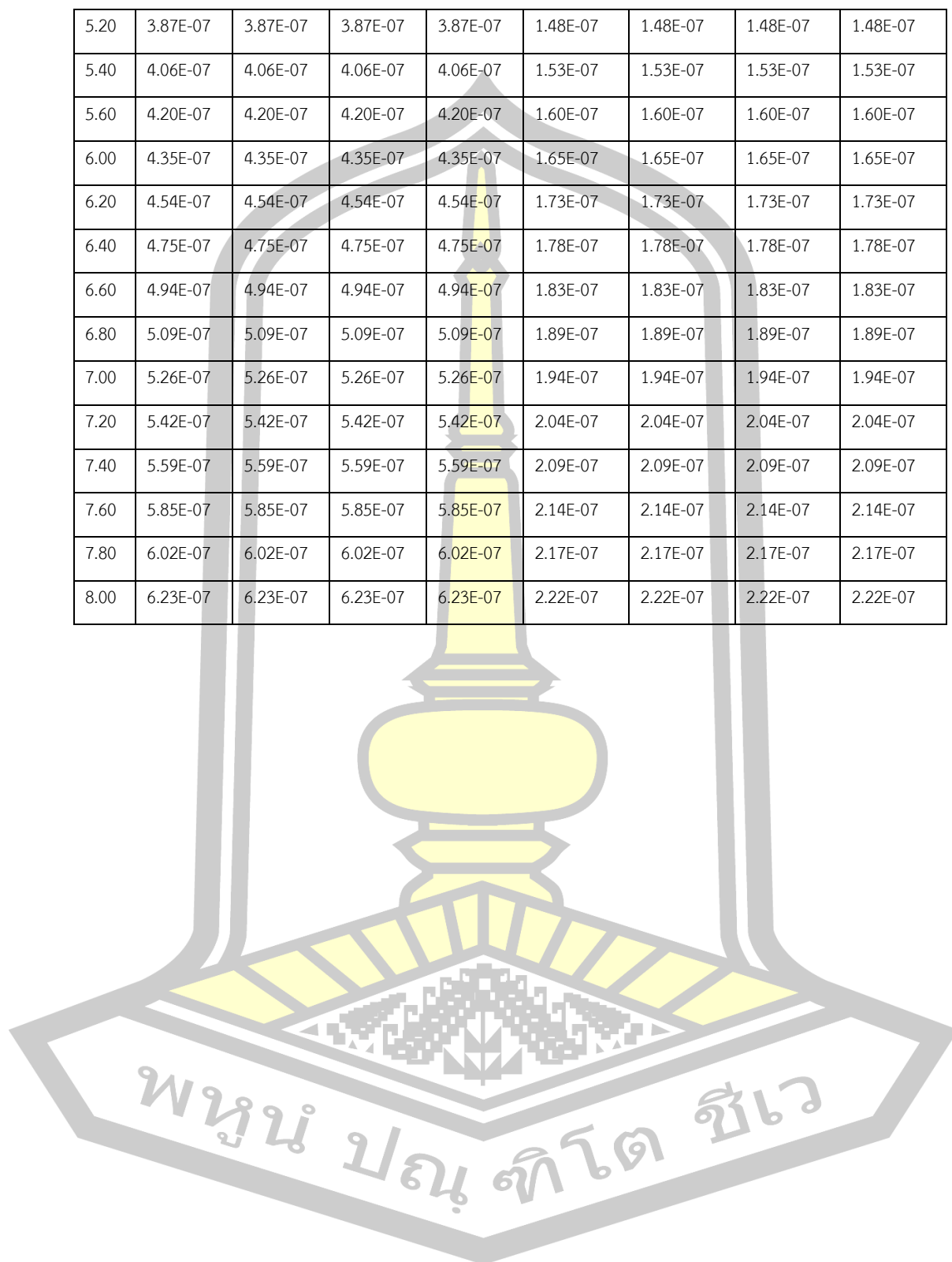
5.20	1.99E-07	1.99E-07	1.99E-07	1.99E-07	8.25E-08	8.25E-08	8.25E-08	8.25E-08
5.40	2.16E-07	2.16E-07	2.16E-07	2.16E-07	8.67E-08	8.67E-08	8.67E-08	8.67E-08
5.60	2.33E-07	2.33E-07	2.33E-07	2.33E-07	9.02E-08	9.02E-08	9.02E-08	9.02E-08
6.00	2.42E-07	2.42E-07	2.42E-07	2.42E-07	9.41E-08	9.41E-08	9.41E-08	9.41E-08
6.20	2.59E-07	2.59E-07	2.59E-07	2.59E-07	9.63E-08	9.63E-08	9.63E-08	9.63E-08
6.40	2.78E-07	2.78E-07	2.78E-07	2.78E-07	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07
6.60	2.95E-07	2.95E-07	2.95E-07	2.95E-07	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07
6.80	3.14E-07	3.14E-07	3.14E-07	3.14E-07	1.08E-07	1.08E-07	1.08E-07	1.08E-07
7.00	3.31E-07	3.31E-07	3.31E-07	3.31E-07	1.12E-07	1.12E-07	1.12E-07	1.12E-07
7.20	3.48E-07	3.48E-07	3.48E-07	3.48E-07	1.16E-07	1.16E-07	1.16E-07	1.16E-07
7.40	3.57E-07	3.57E-07	3.57E-07	3.57E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-07
7.60	3.74E-07	3.74E-07	3.74E-07	3.74E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
7.80	4.00E-07	4.00E-07	4.00E-07	4.00E-07	1.30E-07	1.30E-07	1.30E-07	1.30E-07
8.00	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	1.34E-07	1.34E-07	1.34E-07	1.34E-07



ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบไม่มีฐาน a1b1L10

	a1b1L10							
	1	2	3	AVG	1	2	3	AVG
	a1b1L10(1k)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(1k)	a1b1L10(10k)	a1b1L10(10k)	a1b1L10(10k)	a1b1L10(10k)
-	3.46E-08	3.46E-08	3.46E-08	3.46E-08	2.70E-09	2.70E-09	2.70E-09	2.70E-09
0.20	5.18E-08	5.18E-08	5.18E-08	5.18E-08	1.01E-08	1.01E-08	1.01E-08	1.01E-08
0.40	6.55E-08	6.55E-08	6.55E-08	6.55E-08	1.01E-08	1.01E-08	1.01E-08	2.21E-08
0.60	7.58E-08	7.58E-08	7.58E-08	7.58E-08	2.03E-08	2.03E-08	2.03E-08	2.03E-08
0.80	7.93E-08	7.93E-08	7.93E-08	7.93E-08	2.54E-08	2.54E-08	2.54E-08	2.54E-08
1.00	8.62E-08	8.62E-08	8.62E-08	8.62E-08	3.05E-08	3.05E-08	3.05E-08	3.05E-08
1.20	8.96E-08	8.96E-08	8.96E-08	8.96E-08	3.66E-08	3.66E-08	3.66E-08	3.66E-08
1.40	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07	4.17E-08	4.17E-08	4.17E-08	4.17E-08
1.60	1.19E-07	1.19E-07	1.19E-07	1.19E-07	4.68E-08	4.68E-08	4.68E-08	4.68E-08
1.80	1.33E-07	1.33E-07	1.33E-07	1.33E-07	5.19E-08	5.19E-08	5.19E-08	5.19E-08
2.00	1.43E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.43E-07	5.70E-08	5.70E-08	5.70E-08	5.70E-08
2.20	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	6.01E-08	6.01E-08	6.01E-08	6.01E-08
2.40	1.69E-07	1.69E-07	1.69E-07	1.69E-07	6.52E-08	6.52E-08	6.52E-08	6.52E-08
2.60	1.76E-07	1.76E-07	1.76E-07	1.76E-07	7.23E-08	7.23E-08	7.23E-08	7.23E-08
2.80	1.93E-07	1.93E-07	1.93E-07	1.93E-07	7.74E-08	7.74E-08	7.74E-08	7.74E-08
3.00	2.10E-07	2.10E-07	2.10E-07	2.10E-07	8.35E-08	8.35E-08	8.35E-08	2.37E-07
3.20	2.19E-07	2.19E-07	2.19E-07	2.19E-07	8.86E-08	8.86E-08	8.86E-08	8.86E-08
3.40	2.36E-07	2.36E-07	2.36E-07	2.36E-07	9.37E-08	9.37E-08	9.37E-08	9.37E-08
3.60	2.56E-07	2.56E-07	2.56E-07	2.56E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07
3.80	2.74E-07	2.74E-07	2.74E-07	2.74E-07	1.07E-07	1.07E-07	1.07E-07	1.07E-07
4.00	2.91E-07	2.91E-07	2.91E-07	2.91E-07	1.12E-07	1.12E-07	1.12E-07	1.12E-07
4.20	3.01E-07	3.01E-07	3.01E-07	3.01E-07	1.17E-07	1.17E-07	1.17E-07	1.17E-07
4.40	3.18E-07	3.18E-07	3.18E-07	3.18E-07	1.22E-07	1.22E-07	1.22E-07	1.22E-07
4.60	3.39E-07	3.39E-07	3.39E-07	3.39E-07	1.27E-07	1.27E-07	1.27E-07	1.27E-07
4.80	3.56E-07	3.56E-07	3.56E-07	3.56E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07
5.00	3.73E-07	3.73E-07	3.73E-07	3.73E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.43E-07

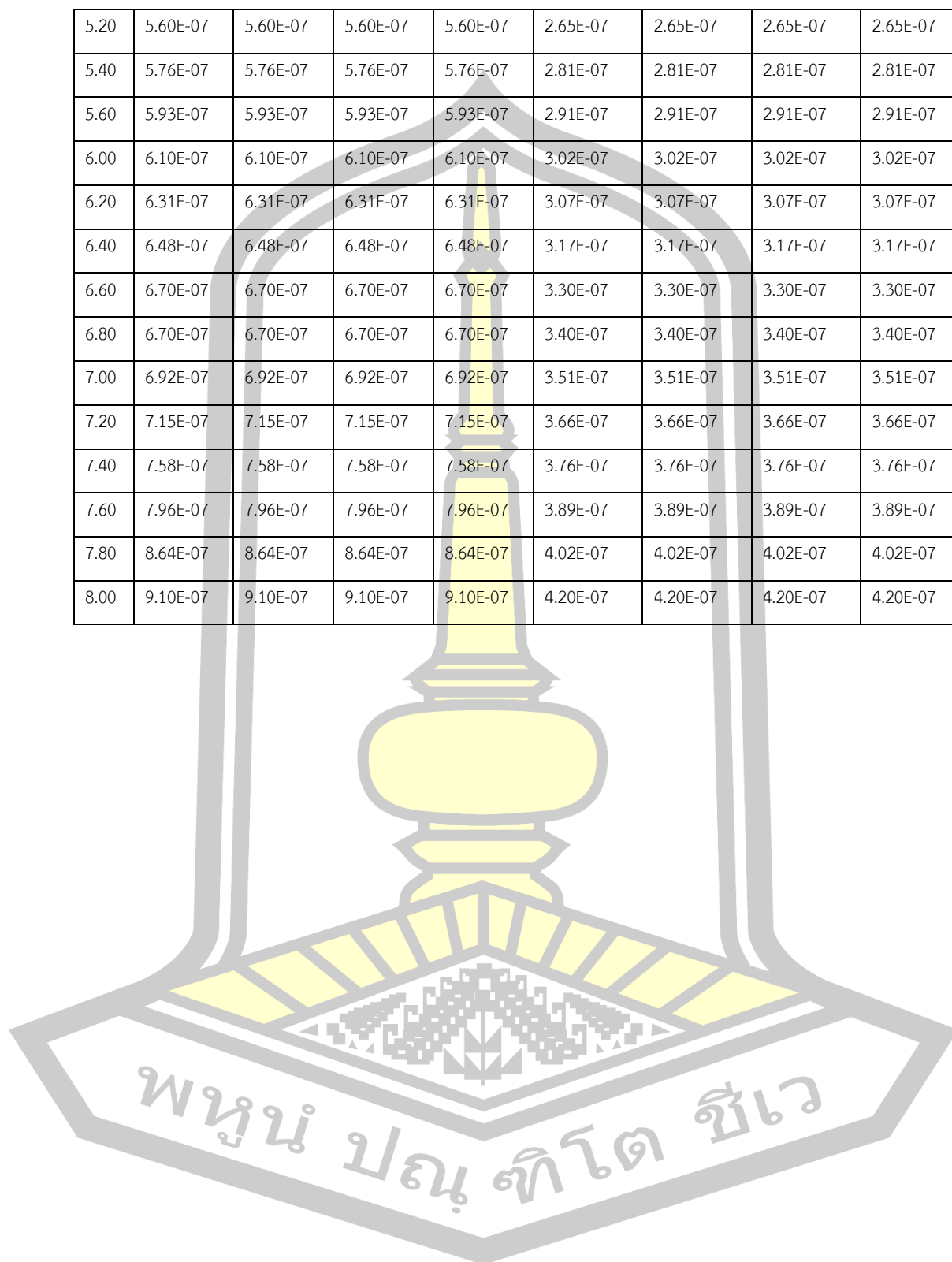
5.20	3.87E-07	3.87E-07	3.87E-07	3.87E-07	1.48E-07	1.48E-07	1.48E-07	1.48E-07
5.40	4.06E-07	4.06E-07	4.06E-07	4.06E-07	1.53E-07	1.53E-07	1.53E-07	1.53E-07
5.60	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	1.60E-07	1.60E-07	1.60E-07	1.60E-07
6.00	4.35E-07	4.35E-07	4.35E-07	4.35E-07	1.65E-07	1.65E-07	1.65E-07	1.65E-07
6.20	4.54E-07	4.54E-07	4.54E-07	4.54E-07	1.73E-07	1.73E-07	1.73E-07	1.73E-07
6.40	4.75E-07	4.75E-07	4.75E-07	4.75E-07	1.78E-07	1.78E-07	1.78E-07	1.78E-07
6.60	4.94E-07	4.94E-07	4.94E-07	4.94E-07	1.83E-07	1.83E-07	1.83E-07	1.83E-07
6.80	5.09E-07	5.09E-07	5.09E-07	5.09E-07	1.89E-07	1.89E-07	1.89E-07	1.89E-07
7.00	5.26E-07	5.26E-07	5.26E-07	5.26E-07	1.94E-07	1.94E-07	1.94E-07	1.94E-07
7.20	5.42E-07	5.42E-07	5.42E-07	5.42E-07	2.04E-07	2.04E-07	2.04E-07	2.04E-07
7.40	5.59E-07	5.59E-07	5.59E-07	5.59E-07	2.09E-07	2.09E-07	2.09E-07	2.09E-07
7.60	5.85E-07	5.85E-07	5.85E-07	5.85E-07	2.14E-07	2.14E-07	2.14E-07	2.14E-07
7.80	6.02E-07	6.02E-07	6.02E-07	6.02E-07	2.17E-07	2.17E-07	2.17E-07	2.17E-07
8.00	6.23E-07	6.23E-07	6.23E-07	6.23E-07	2.22E-07	2.22E-07	2.22E-07	2.22E-07

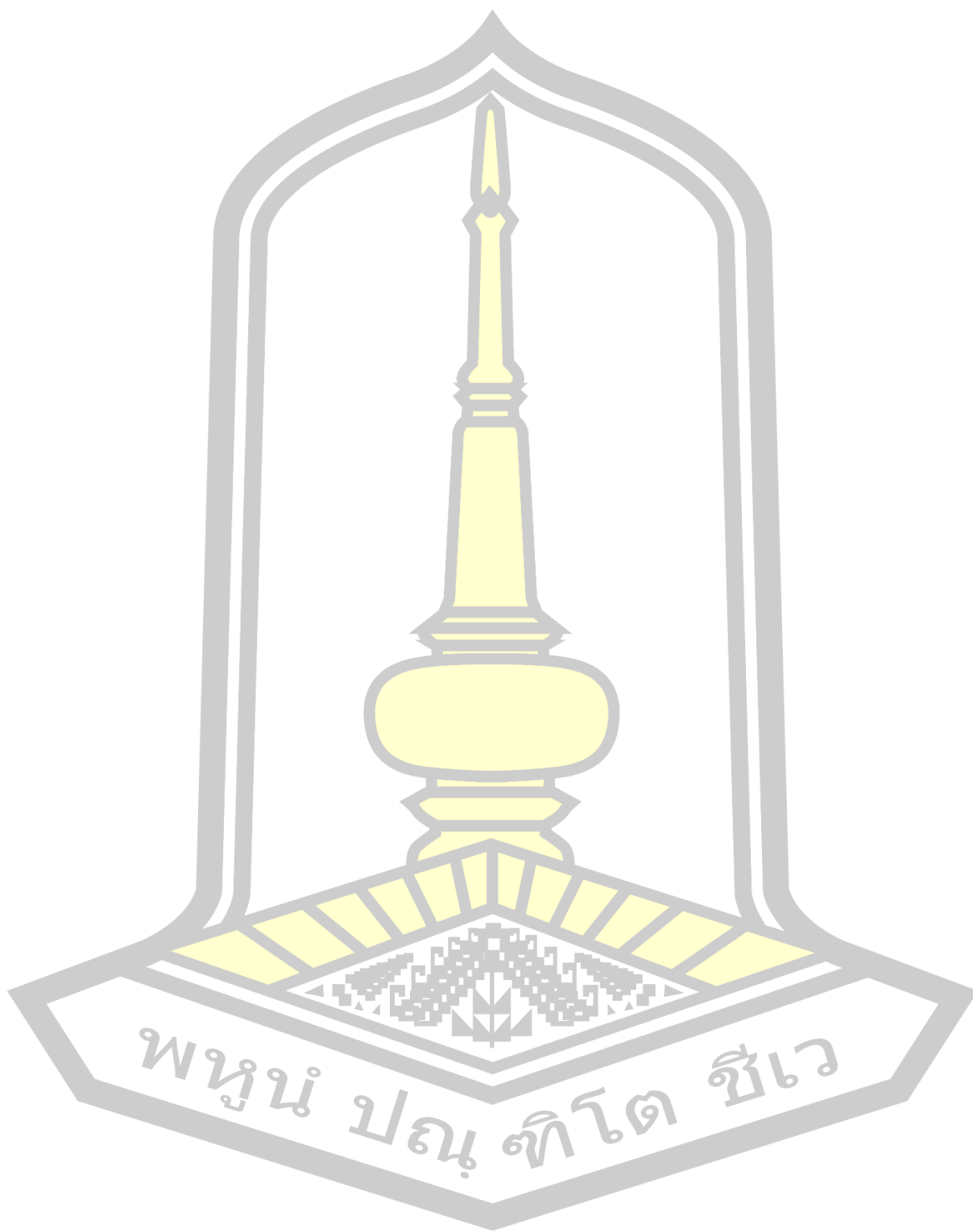


ความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูดัชนีแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบไม่มีฐาน a1b1L15

	a1b1L15							
	1	2	3	AVG	1	2	3	AVG
	a1b1L15(1k)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(1k)	a1b1L15(10k)	a1b1L15(10k)	a1b1L15(10k)	a1b1L15(10k)
-	4.92E-08	4.92E-08	4.92E-08	4.92E-08	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10
0.20	8.36E-08	8.36E-08	8.36E-08	8.36E-08	1.20E-08	1.20E-08	1.20E-08	1.20E-08
0.40	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	2.12E-08	2.12E-08	2.12E-08	2.12E-08
0.60	1.21E-07	1.21E-07	1.21E-07	1.21E-07	3.14E-08	3.14E-08	3.14E-08	3.14E-08
0.80	1.39E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.39E-07	4.06E-08	4.06E-08	4.06E-08	4.06E-08
1.00	1.58E-07	1.58E-07	1.58E-07	1.58E-07	5.08E-08	5.08E-08	5.08E-08	5.08E-08
1.20	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	6.30E-08	6.30E-08	6.30E-08	6.30E-08
1.40	1.92E-07	1.92E-07	1.92E-07	1.92E-07	7.32E-08	7.32E-08	7.32E-08	7.32E-08
1.60	2.26E-07	2.26E-07	2.26E-07	2.26E-07	8.14E-08	8.14E-08	8.14E-08	8.14E-08
1.80	2.44E-07	2.44E-07	2.44E-07	2.44E-07	9.36E-08	9.36E-08	9.36E-08	9.36E-08
2.00	2.61E-07	2.61E-07	2.61E-07	2.61E-07	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07
2.20	2.83E-07	2.83E-07	2.83E-07	2.83E-07	1.09E-07	1.09E-07	1.09E-07	1.09E-07
2.40	3.00E-07	3.00E-07	3.00E-07	3.00E-07	1.21E-07	1.21E-07	1.21E-07	1.21E-07
2.60	3.18E-07	3.18E-07	3.18E-07	3.18E-07	1.31E-07	1.31E-07	1.31E-07	1.31E-07
2.80	3.40E-07	3.40E-07	3.40E-07	3.40E-07	1.44E-07	1.44E-07	1.44E-07	1.44E-07
3.00	3.57E-07	3.57E-07	3.57E-07	3.57E-07	1.54E-07	1.54E-07	1.54E-07	1.54E-07
3.20	3.74E-07	3.74E-07	3.74E-07	3.74E-07	1.64E-07	1.64E-07	1.64E-07	1.64E-07
3.40	3.95E-07	3.95E-07	3.95E-07	3.95E-07	1.69E-07	1.69E-07	1.69E-07	1.69E-07
3.60	4.16E-07	4.16E-07	4.16E-07	4.16E-07	1.79E-07	1.79E-07	1.79E-07	1.79E-07
3.80	4.33E-07	4.33E-07	4.33E-07	4.33E-07	1.89E-07	1.89E-07	1.89E-07	1.89E-07
4.00	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07	2.02E-07	2.02E-07	2.02E-07	2.02E-07
4.20	4.67E-07	4.67E-07	4.67E-07	4.67E-07	2.12E-07	2.12E-07	2.12E-07	2.12E-07
4.40	4.86E-07	4.86E-07	4.86E-07	4.86E-07	2.22E-07	2.22E-07	2.22E-07	2.22E-07
4.60	5.03E-07	5.03E-07	5.03E-07	5.03E-07	2.36E-07	2.36E-07	2.36E-07	2.36E-07
4.80	5.26E-07	5.26E-07	5.26E-07	5.26E-07	2.47E-07	2.47E-07	2.47E-07	2.47E-07
5.00	5.43E-07	5.43E-07	5.43E-07	5.43E-07	2.55E-07	2.55E-07	2.55E-07	2.55E-07

5.20	5.60E-07	5.60E-07	5.60E-07	5.60E-07	2.65E-07	2.65E-07	2.65E-07	2.65E-07
5.40	5.76E-07	5.76E-07	5.76E-07	5.76E-07	2.81E-07	2.81E-07	2.81E-07	2.81E-07
5.60	5.93E-07	5.93E-07	5.93E-07	5.93E-07	2.91E-07	2.91E-07	2.91E-07	2.91E-07
6.00	6.10E-07	6.10E-07	6.10E-07	6.10E-07	3.02E-07	3.02E-07	3.02E-07	3.02E-07
6.20	6.31E-07	6.31E-07	6.31E-07	6.31E-07	3.07E-07	3.07E-07	3.07E-07	3.07E-07
6.40	6.48E-07	6.48E-07	6.48E-07	6.48E-07	3.17E-07	3.17E-07	3.17E-07	3.17E-07
6.60	6.70E-07	6.70E-07	6.70E-07	6.70E-07	3.30E-07	3.30E-07	3.30E-07	3.30E-07
6.80	6.70E-07	6.70E-07	6.70E-07	6.70E-07	3.40E-07	3.40E-07	3.40E-07	3.40E-07
7.00	6.92E-07	6.92E-07	6.92E-07	6.92E-07	3.51E-07	3.51E-07	3.51E-07	3.51E-07
7.20	7.15E-07	7.15E-07	7.15E-07	7.15E-07	3.66E-07	3.66E-07	3.66E-07	3.66E-07
7.40	7.58E-07	7.58E-07	7.58E-07	7.58E-07	3.76E-07	3.76E-07	3.76E-07	3.76E-07
7.60	7.96E-07	7.96E-07	7.96E-07	7.96E-07	3.89E-07	3.89E-07	3.89E-07	3.89E-07
7.80	8.64E-07	8.64E-07	8.64E-07	8.64E-07	4.02E-07	4.02E-07	4.02E-07	4.02E-07
8.00	9.10E-07	9.10E-07	9.10E-07	9.10E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07	4.20E-07





พหุณฺ์ ปณฺุ ทิตฺ สวี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	กิตติพงศ์ อัจหาญ
วันเกิด	20 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	246/71 หมู่ที่ 6 ตำบลสำราญ อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทิโต ชีเว